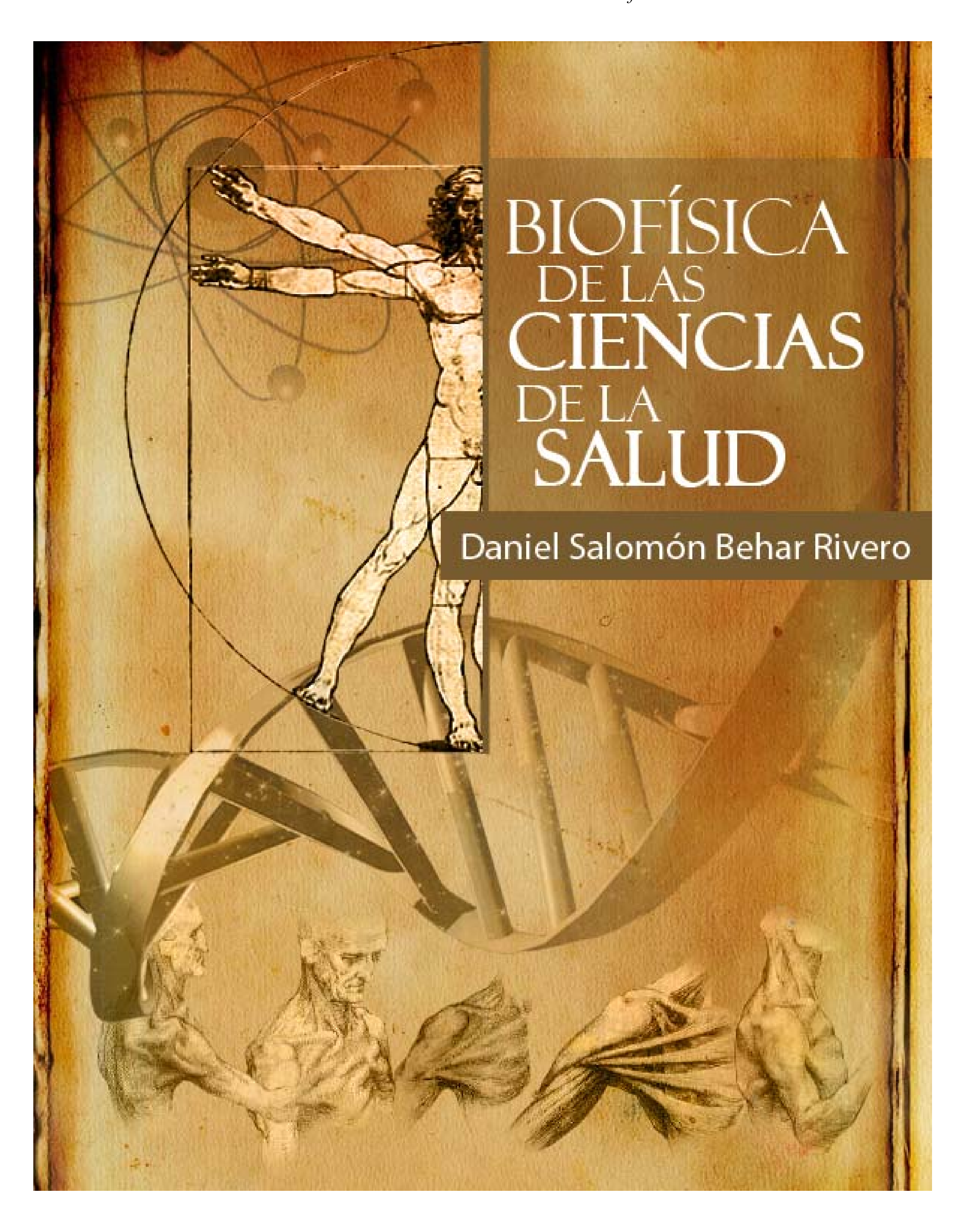

BIOFÍSICA
DE LAS
CIENCIAS
DE LA
SALUD
Daniel Salomón Behar Rivero

Título

BIOFÍSICA DE LAS CIENCIAS DE LA SALUD

Autor:

Profesor Titular, Doctor en Ciencias Daniel Salomón Behar Rivero

PREFACIO

A pesar de que en el área educativa no es fácil utilizar el tipo de ensayos controlados y aleatorizados, que en el ámbito clínico proporcionan los datos más sólidos sobre el valor de la intervención efectuada, no es inalcanzable y es imprescindible buscar o elaborar la más amplia y rigurosa evidencia posible acerca de la bondad de los métodos educativos existentes y de los que están apareciendo en los últimos decenios [1]. El solapamiento de las fronteras de todas las ciencias y particularmente su repercusión en la educación médica universitaria requiere con urgencia ser asumida científicamente y con la adecuada pertinencia social. O sea, que requiere ser asumida como un campo de estudio que demanda mayores investigaciones, redefiniciones, validaciones y reconstrucciones teóricas para que como práctica pueda estar al día con las exigencias de las transformaciones sociales, políticas, científicas y técnicas que representa la actualidad. Desde la mitad del siglo XX, con los primeros indicios de lo que hoy conocemos como la tercera revolución industrial con la aparición de la robótica, la electrónica, la informática y las telecomunicaciones, la educación superior tuvo ante sí un creciente fenómeno relacionado directamente con uno de sus fines: la formación de la competencia [2].Hoy día no sólo se ha convertido en una necesidad el tomar en cuenta la naturaleza de este fenómeno, sino que dado los períodos cada vez más cortos en que se están produciendo los cambios en la esfera de la praxis médica, por los resultados del desarrollo científico y la evolución tecnológica que esto conlleva, la educación universitaria tiene un desafío enorme, sobre todo por los modos tradicionales y conservadores como se lleva a cabo y muy en particular, dentro de la enseñanza de las ciencias médicas.

No se encuentran muchos estudios sobre educación médica universitaria y relacionados con sus vínculos e interacciones con las ciencias básicas, en particular la física, sin embargo es

de necesidad y urgencia que se estudien y se tomen en consideración las formas adecuadas para su impartición dentro de la ciencias médicas atendiendo a su histórico vinculo gnoseológico y a los problemas que se asocian a la desvinculación existente entre ellas y, que dificultan grandemente la apropiación de forma creadora, no mecánica, de los conocimientos básicos de la física para el correcto desempeño profesional del médico. Esto significa que la docencia médica no ha sido un objetivo primordial de las autoridades encargadas de regir esta actividad lo que convierte esta situación en un problema de la formación académica de algunas especialidades médicas como la radioterapia oncológica, medicina nuclear, neurofisiología y muchas otras que requieren el conocimiento e interpretación de los fenómenos físicos que se ponen de manifiesto en los procesos biológicos. Para lograr ese vinculo y que se solapen estos conocimientos de la manera más armónica es necesario comenzar por realizar un análisis de las peculiaridades didácticas de la enseñanza de la física.

La enseñanza de las ciencias en general y de la Física en particular, han estado signadas por diversas tendencias, entre las cuales podemos destacar diversas propuestas de innovación, algunas de ellas fundamentadas teóricamente, otras responden a intuiciones muy generalizadas, a un “pensamiento docente espontáneo” que impone sus “evidencias”, escapando así a la reflexión crítica.

Estos planteamientos ateóricos están dejando paso a un esfuerzo de fundamentación y evaluación que une estrechamente la innovación a la investigación educativa [3].

El núcleo de ideas didácticas fundamentales donde encuentran unidad concepciones epistemológicas, psicológicas y pedagógicas, de validez en la enseñanza de las ciencias lo conforman:

- La necesidad de considerar durante el proceso de enseñanza aprendizaje las características distintivas de la actividad psíquica humana.

- La obligación de reflejar durante el proceso de enseñanza aprendizaje las características fundamentales de la actividad investigadora contemporánea.

El enfoque histórico cultural ofrece una base teórica de grandes potencialidades para el diseño de estrategias y propuestas de enseñanza en el campo de las ciencias que contemplen estas ideas y dan un margen abierto a muchas más posibilidades, ya que este enfoque asume al educando como centro del proceso de enseñanza aprendizaje, quien construye y reconstruye el conocimiento por medio de operaciones y actividades que se realizan en interacción social, proceso en el cual el objeto de aprendizaje pasa del plano interpsicológico al intrapsicológico, produciéndose el proceso conocido como "interiorización", a la vez que promueve el desarrollo pleno del sujeto. Este proceso ocurre en un medio social y cultural determinado en el que se enraíza. En el mismo juegan un rol determinante los mediadores, que son instrumentos que transforman la realidad, propiciando la interacción objeto-sujeto y sujeto-sujeto.

Según **Vygotski,* ….todas las funciones psíquicas superiores comparten el rasgo de ser procesos mediatizados, es decir, incluyen en su estructura, como elemento central e indispensable, el empleo del ***<u>signo</u>*** como medio esencial de dirección y control del propio proceso [4]. En lo relativo a la formación de conceptos de cualquier ciencia, ese signo lo constituye la palabra, que actúa como medio de formación y/o definición de los conceptos y se convierte más tarde en su símbolo [5].

**Lev Semyonovich Vigotsky (1896-1934)- destacado teórico de la psicología del desarrollo y claro precursor de la neuropsicología. La idea fundamental de su obra es la de que el desarrollo de los humanos únicamente puede ser explicado en términos de interacción social.*

La comunicación basada en la comprensión racional y en la transmisión premeditada del pensamiento y de las sensaciones exige necesariamente un determinado sistema de medios, prototipo del cual ha sido, es y será siempre el lenguaje humano, surgido de la necesidad de comunicación [6].

El lenguaje ***simbólico*** de la Física, basado fundamentalmente en la modulación matemática y ecuacional, es el mediatizador por excelencia en el proceso de aprendizaje de esta disciplina; la comprensión de los signos que lo integran, su interpretación correcta e interiorización resultan esenciales para la formación de conceptos y del pensamiento teórico en los educandos; constituye el medio que hará posible la plena comunicación profesor-educando en el plano de los contenidos de la asignatura, por lo que resulta imprescindible su conocimiento (del simbolismo matemático) para la comprensión del mensaje, de la información. El educando tendrá dominio de este lenguaje si es capaz de emplearlo correctamente en la interpretación y representación de las diversas situaciones correspondientes a esta ciencia, así como operar con él al enfrentar situaciones problemáticas. Esto significa que debe identificar los signos contenidos en una representación simbólica (ecuación), explicar la relación que se manifiesta entre los diferentes signos que la componen, expresando el significado de su integración como un todo (interpretación), y tener tanto una imagen de lo denotado en los símbolos como significado y representación de la realidad física, como representar por medio de símbolos la imagen de la realidad que se ha formado en su mente [7].

Para la correcta interpretación de ese simbolismo y el aprendizaje de este lenguaje, el educando debe comenzar una vez que se inicia en el estudio de la Física, para lo cual se pueden tomar como base muchos de los conceptos, signos y representaciones propios de la matemática que ya deben resultar más afines al educando y que debe emplear o transferir a

las situaciones que estudia esta asignatura, así como conceptos generales de la ciencia y hasta del lenguaje común, a los que en la mayoría de los casos debe atribuirle diferente significado al conocido hasta ese momento. Al igual que en el caso de la asignatura de física, la complejidad del lenguaje simbólico se incrementa a medida que el estudiante transita a niveles superiores, alcanzando su mayor complejidad y abstracción en la educación superior. Atendiendo a esto, el aprendizaje de la Física requiere de un proceder didáctico que no puede ser el formal reproductivo o memorístico. Entre los requerimientos para su estudio debe dársele gran importancia al proceder que ha de seguirse para la formación y desarrollo del pensamiento teórico, sobre cuya base se construyen los conceptos científicos. Una de las vías que pudiera facilitar esto sería que el aprendizaje del lenguaje simbólico de la Física tenga significado y sentido para el educando, tanto desde el punto de vista cognitivo, como de la unidad cognitivo-afectiva en la significación, es decir, que lo comprendan y tenga para ellos sentido personal. La educación médica carece del proceso formativo básico que permita adueñarse de manera racional del simbolismo necesario para que se puedan interpretar minimamente y de manera racional y adecuada, los conceptos que recogen los planes de estudio donde se inmiscuyen aspectos y fenómenos físicos.

Para ilustrar lo expuesto hasta aquí lo podemos denotar en el siguiente ejemplo:

En la implementación de las técnicas nucleares dentro de la medicina y, en particular la radioterapia, es fundamental el manejo de varios conceptos relacionados con los fenómenos que ocurren en la explotación de los isótopos radiactivos, una de estas definiciones es el concepto de ***decaimiento*** y que esta relacionada con la desintegración radiactiva. Plantear este proceso usando el simbolismo propio de la física, se haría de la siguiente manera:

$$I = I_0 \, . \, e^{-ln\,2\,(t/\tau)}$$

Donde:

I –Potencia de dosis a calcular (decaída)

I_0-Potencia de dosis inicial (calibrada)

t- Tiempo transcurrido

τ- Período de semidesintegración del radioisótopo.

- ln 2- Logaritmo neperiano de 2 = -0.693

La representación simbólica de esta definición por medio de esta ecuación seria suficiente para que un estudiante de física o cualquier educando debidamente instruido en esta ciencia puedan entender su esencia y el fenómeno que subyace en la misma.

El médico no esta preparado ni formado para poder llegar a esa conclusión en la manera simbólica en que esta denotada, sin embargo podría entender el principio que se pone de manifiesto en este fenómeno si se planteara el mismo evitando el aparato ecuacional-matemático (simbólico), quedando de la manera siguiente:

"**Decaimiento radiactivo"**

**"*Hay núcleos que se transforman a través de diferentes mecanismos conocidos como decaimientos radiactivos. Los núcleos de los isótopos radiactivos emiten radiaciones, transformándose en otros isótopos (radiactivos o no). Al emitir radiación la cantidad de átomos del isótopo original va mermando, y su población disminuye, decae. La expresión decaimiento radiactivo, asociada a esta progresiva disminución de la cantidad de átomos, se utiliza normalmente para indicar el proceso de emisión de la*

radiación: es común utilizar la expresión "tal átomo decae" para significar que se ha producido una radiación, es decir la desintegración del núcleo original".

El médico en proceso de formación de alguna especialidad médica que requiera de este conocimiento puede entender esta definición y podrá asociarla correctamente en su futura práctica profesional, permitiéndole también establecer un dialogo adecuado con el equipo multidisciplinario con quien comparte su vida profesional. En este caso la ausencia del simbolismo no impide la apropiación lógica y adecuada de los conocimientos que les son imprescindibles en su labor.

En las ciencias médicas se exige una mayor alfabetización científica debido a la interacción y al solapamiento de sus fronteras con las del resto de las ciencias, pero esta alfabetización debe ser consecuente con las características del auditorio al que va dirigido. Como expresa Stokes [8] en su artículo y, relacionándolo con el tema que se expone en este trabajo: **"*el desafió esta en que la comunidad científica y educativa*** (en este caso la referente a las ciencias médicas) ***trabajen conjuntamente para crear las condiciones que permita que el estudiante pueda adaptarse previsiblemente al horizonte cambiante de la ciencia"*** (debido a la introducción tecnológica que ha sufrido en los últimos 20 años y que forma parte del cotidiano quehacer del médico)

En aras de comprender esta afirmación haremos alusión al inmejorable ejemplo que G. Stokes usa en su artículo ***"se puede esperar que el estudiante aprecie, tenga conocimientos y entienda el arte de Shakespeare o Cervantes sin que esto signifique que tengan que escribir trabajos de calidad semejante"***

Usando un símil a la situación que nos lleva a la realización de esta reflexión, se establece que no es necesario que el estudiante de medicina y en concreto el residente de alguna de

las especialidades medicas que incluyen en sus planes de estudios elementos de la física, tengan que dominar el simbolismo propio en que se expresa la física para poder entender los principales fenómenos que se ponen de manifiesto en la interacción de estas ciencias.

En una entrevista al escritor español Camilo José Cela, premio Nóbel en 1989 de Literatura expresaba dos juicios que creemos aportan sendos motivos de reflexión útiles, prácticos y relevantes para científicos y educadores; ***por un lado que quizás en esta sociedad de la información exista más información de la necesaria y, por otro que ese exceso de información*** (en determinados contextos) ***puede ser factor de ansiedad*** [9].

También el destacado físico británico Stephen Hawking expresa en sus comentarios relacionados con su libro *La Historia del Tiempo,* una postura similar con respecto al exceso de información, en este caso al simbolismo matemático y, plantea….***pero la ciencia moderna se ha hecho tan técnica que sólo un pequeño número de especialistas son capaces de dominar las matemáticas utilizadas en su descripción…… las ideas básicas pueden ser enunciadas sin matemáticas, de tal manera que las personas sin una educación científica las puedan entender…..***

Las insuficiencias en cuanto a conocimientos de física de la formación académica del médico que hemos estado debatiendo obedecen, en nuestra opinión, más que a insuficiencias en los planes de estudio, a deficiencias en su ejecución, en la forma que se imparten esos conocimientos y la necesidad de realizar las adecuaciones necesarias que hay que tener en cuenta por las características del educando a que va dirigido ese conocimiento y, es lo que se pretende adecuar en esta obra.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

Originalmente el conocimiento de la naturaleza era en gran medida la observación e interrelación de todas las experiencias, sin establecer divisiones. Los eruditos pitagóricos sólo distinguían cuatro ciencias: aritmética, geometría, música y astronomía. En la época del filósofo griego Aristóteles (384-322 a.C.), sin embargo, ya se reconocían otros campos: mecánica, óptica, física, meteorología, zoología y botánica.

La química permaneció fuera de la corriente principal de la ciencia hasta la época del científico británico Robert Boyle (1627-1691), en el siglo XVII, y la geología sólo alcanzó la categoría de ciencia en el siglo XVIII. Para entonces el estudio del calor, el magnetismo y la electricidad se había convertido en una parte de la física. Durante el siglo XIX los científicos reconocieron que las matemáticas puras se distinguían de las otras ciencias por ser una lógica de relaciones cuya estructura no depende de las leyes de la naturaleza. Sin embargo, su aplicación a la elaboración de teorías científicas ha hecho que se le siga clasificando como ciencia. [10]

La educación médica se estructuró en Europa en el siglo XII, simultáneamente en las universidades medievales de París, Bolognia, y Oxford, por ésta época sólo se enseñó Medicina y Teología, era la autoridad religiosa la que dominaba la formación en el arte de curar. La legislación sobre la formación médica fue establecida en 1224 por el emperador Federico II (del Sacro Imperio Romano) (1194-1250); el curriculum estaba diseñado para un período de 9 años. Una legislación similar fue adoptada en España a partir de 1283 y en Alemania a partir de 1347. Por esta época la Física no se había estructurado aún como ciencia y en los estudios de Medicina sólo se incluían las Matemáticas como representante del área de las Ciencias Exactas. Este tipo de curriculum se mantuvo vigente hasta el siglo XVIII. Con el desarrollo de la Mecánica por parte del físico y astrónomo italiano Galileo

Galilei (1564-1542) y el físico matemático británico Isaac Newton (1642-1727) (más inspirados en la Filosofía que en las Matemáticas), se inicia la bifurcación entre la Medicina y la Física.

La teoría biológica de alcance más global fue la teoría de la evolución, propuesta por el científico británico Charles Robert Darwin (1809-1882) en su libro *El origen de las especies,* publicado en 1859, que provocó una polémica en la sociedad (no sólo en los ámbitos científicos) tan grande como la obra del astrónomo italiano Nicolás Copérnico (1473-1543). Sin embargo, al empezar el siglo XX el concepto de evolución ya se aceptaba de forma generalizada, aunque su mecanismo genético siguió y sigue siendo discutido.

La enseñanza de la medicina en Cuba fue iniciada en 1726 por los frailes dominicos, religiosos de la orden de predicadores de San Juan de Letrán de La Habana, quienes habían solicitado la autorización real para fundar una universidad bajo el patrocinio de la iglesia en 1670 [10].

Luego de algunas querellas entre dominicos y el obispo se creó la Real y Pontificia Universidad de San Gerónimo de La Habana, el 5 de enero de 1728, que estaba formada por cuatro facultades: Filosofía y Letras, Derecho Civil y Canónico, Teología y Medicina.

A comienzos de la segunda mitad de nuestro siglo se impone en América el sistema **Flexneriano* de formación médica, en el cual se hace distinción entre las ciencias básicas y las clínicas. De acuerdo con este sistema las ciencias básicas contribuyen a formar aquellos conocimientos que luego serán empleados en la formación clínica y la práctica médica.

**Abraham Flexner, Estadounidense,(1866-1959): Se reconoce como el gran reformista y transformador de la educación médica estableciendo una comunidad de intereses entre las ciencias biológicas básicas, la medicina profesional organizada y la educación universitaria*

En este sistema, se incluyen la Física y la Matemática en forma separada dentro del área que por esta época se denominó de estudios generales. Este sistema fue mantenido hasta los años 70, después de lo cual se operó un cambio radical en la enseñanza de la Física, pues cada facultad en forma independiente asumió el manejo de la enseñanza de las que ahora fueron llamadas Ciencias Básicas

La física y la medicina son consideradas generalmente como dos ciencias con características muy diferentes y no vinculadas entre sí, sin tener en cuenta que uno de los rasgos más significativos que caracterizan el desarrollo de la medicina contemporánea es, sin lugar a dudas, la introducción y utilización de conceptos, métodos, etc., básicos y generales de las ciencias exactas, en particular de la física, que se ponen de manifiesto en las aplicaciones terapéuticas de las distintas especialidades médicas.

Desde aproximadamente el siglo X a.C., se sabe que el hombre se interesó por conocer la naturaleza que lo rodeaba, como también a sí mismo, surgiendo de esta manera la *Philosophie Naturalis.* En esa época y hasta el siglo XVII d.C., un mismo individuo se dedicaba a los estudios de la mecánica, la física, la medicina, etc. De ahí que aún hoy se mantiene en la lengua inglesa la misma raíz en las palabras para designar a los profesionales de la medicina y de la física: *physicians y physicists,* respectivamente [11]. Así, la medicina y la física tuvieron un tronco común y a lo largo de la historia son muchos los ejemplos de interrelación entre ambas ciencias, entre los que se pueden citar: Galileo Galilei, (1564-1642) fundador de la física experimental, cuando joven fue estudiante de medicina; él y el fisiólogo Sanctorius de Padua (1561-1636) inventaron casi al mismo tiempo el termómetro, instrumento que tuvo uno de sus primeros usos en la medicina para determinar el estado febril de los pacientes.

En el siglo XVII, Robert Hooke (1635-1703) científico ingles, introduce en el vocabulario biológico el concepto de célula; en esta misma época el médico ingles William Harvey (1578-1657) realiza las primeras investigaciones del flujo sanguíneo, estudios que prosiguió el fisiólogo francés Jean Louis Marie Poiseuille (1799-1869) en el siglo XIX.

El fisiólogo italiano Luigi Galvani (1737-1798) descubre la relación existente entre las contracciones de los músculos de las ranas y las descargas eléctricas, paso importante en el estudio de los fenómenos eléctricos.

El médico alemán Julius Robert Von Mayer (1814-1878) fue el primero en enunciar una de las leyes más generales de la naturaleza, la ley de conservación de la energía. Los físicos Maxwell (1831-1879) y Helmoltz (1821-1894) desarrollaron la teoría de la visión de los tres colores, confirmada a través de mediciones de la absorción de la luz por diferentes conos de los ojos.

El descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923) en 1895 y el de la radiactividad por Antoine Henri Becquerel (1852-1908) al año siguiente, son dos hechos que marcan cambios trascendentales en la interrelación entre la física y la medicina, que determinan rasgos específicos en el desarrollo alcanzado por la ciencia médica actual.[12]

Por su parte, sólo a los tres meses de descubiertos los rayos X, el propio Roentgen interpuso su mano en el paso de un haz de estos rayos, y en una placa fotográfica situada más adelante apareció "una foto de sus huesos". Esto dotó a los médicos de un método con el cual se soñaba desde mucho tiempo atrás: cómo realizar estudios de anatomía en seres vivos y no solamente en cadáveres. La aplicación del tubo de rayos X del ingeniero y físico norteamericano William David Coolidge (1873-1975) permitió obtener haces de rayos X más intensos e introducir su empleo con mayor eficiencia en la práctica clínica cotidiana.

El desarrollo de teorías de la física atómica y nuclear, junto con los métodos de purificación de las sustancias radiactivas y la obtención de radioisótopos, trajo como consecuencia su

utilización en el diagnóstico clínico a finales de la década de los 20, de los cuales una de las primeras aplicaciones fue el empleo del I-131 en el diagnóstico del hipertiroidismo. De esta forma nace la medicina nuclear que conjuga armónicamente el sistema de conocimiento de dos ciencias que a primera vista parecen muy disímiles [13].

La continua interacción entre las ciencias médicas y la física contribuyó al surgimiento de una nueva disciplina científica, la Física Médica, que se ocupa de la aplicación de los conceptos y métodos de Física en la Medicina o Ciencias de la Salud, llevados a la práctica por el radiofísico o físico médico, para beneficio y seguridad de la practica médica contemporánea. Las puertas que ha abierto la física a las ciencias médicas y que han aportado técnicas como el diagnóstico por imágenes, la medicina nuclear o el empleo del magnetismo, han permitido significativas mejoras en la prevención, diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Los físicos que desarrollan su actividad en el área de la medicina, trabajan en el análisis de imágenes, la radioterapia, el desarrollo de técnicas e instrumentos, en la enseñanza universitaria y, por supuesto, en las investigaciones destinadas a la pertenencia más preciada que posee el ser humano, la salud [14].

El año 2005, dedicado por la comunidad internacional a la Física en conmemoración de la publicación de los artículos de Einstein, dibujó una oportunidad única para difundir a la Sociedad la importancia de la Física en la Medicina y esto se ve reflejado en el mejor ejemplo que evidencia la actual interacción de las ciencias médicas con la física y las ciencias aplicadas, los Premios Nóbel en Medicina y Fisiología otorgados a profesionales no médicos por la importancia del resultado de sus investigaciones en esta esfera y, que a continuación hacemos mención de algunos, a manera de ejemplo para contribuir a evidenciar esta relación histórica [15].

Maurice Wilkins biofísico británico fue galardonado con el Premio Nóbel de Fisiología y Medicina en 1962. Wilkins estudió la estructura molecular del ácido desoxirribonucleico

(ADN) mediante técnicas de difracción de los rayos X y descubrió que la molécula parecía tener una estructura de doble hélice.

Alan Lloyd Hodgkin, biofísico británico que compartió el Premio Nóbel de Fisiología y Medicina en 1963 con Andrew F. Huxley por formular las ecuaciones matemáticas que expresan los fenómenos eléctricos que acompañan a la descarga de una única célula nerviosa o neurona.

Max Delbrück nació en Berlín, Alemania en 1906. Estudió Física en la Universidad de Götingen, Sus trabajos, con los que obtuvo el Premio Nóbel de Fisiología y Medicina en 1969 , versaron sobre los virus bacteriófagos.

Allan M. Cormack nació en Johannesburgo (Sudáfrica) en 1924. Estudió Ingeniería Electrónica y Física en la Universidad de Capetown de Ciudad del Cabo. Obtiene el Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1979 compartido con Godfrey Mewbold Hounsfield por el desarrollo y descubrimiento de la Tomografía axial computarizada

Erwin Neher nació en 1944 en Landsberg am Lech, Alemania. Biofísico que compartió el Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1991 con Bert Sakmann por sus estudios sobre los canales de iones presentes en la membrana de la célula.

Sir Peter Mansfield, (Nacido el 9 de octubre, de 1933), físico británico galardonado con el Premio Nóbel de Fisiología o Medicina del 2003 por invención y desarrollo de la resonancia magnética nuclear. Compartido con Paul Christian Lauterbur

Lo expuesto hasta aquí evidencia que no ha sido reciente el interés de los físicos, matemáticos y profesionales de las ciencias básicas y tecnológicas por la biología y las ciencias biomédicas y, da una medida del nivel de solapamiento existente entre estas ciencias, lo que establece una mayor demanda de alfabetización en estos conocimientos por parte de los profesionales de la medicina que permita una mejor interacción en el trabajo

multidisciplinario de la educación y la práctica médica. Ello implica salirse de las barreras disciplinares e intentar hacer el esfuerzo de entender los argumentos de otras disciplinas. Ante la pregunta de si es posible otra dinámica en el mundo académico-investigador de las ciencias médicas, mi respuesta es claramente afirmativa. Cierto es, que ello supone muchos cambios, pero creo que es posible. Este libro tiene como objetivo vincular de una manera sencilla, amena y en un lenguaje asequible a este auditorio sui generis, las relaciones básicas existentes entre los fenómenos físicos que se ven asociados a los biofenómenos de la biología y la fisiología humana, sin el uso indiscriminado del simbolismo propio que caracteriza la enseñanza de la física, permitiendo de esta manera que el medico se apropie de los conocimientos necesarios imprescindibles que favorezcan su practica y desempeño profesional. Para lograr esto y entender el funcionamiento del cuerpo humano, recurriremos a las analogías y de ellas, obtener modelos que nos permitan alcanzar nuestra meta.

Aquí se presenta a un nivel básico el funcionamiento de algunos órganos, sistemas y sentidos del cuerpo humano y la física relacionada con ellos; transitando desde las particularidades de la mecánica clásica representada en un hueso, pasando por la interacción de las radiaciones electromagnéticas y corpusculares con la biología humana, y describiendo los fenómenos físicos que se relacionan con las técnicas más avanzadas en el tratamiento de diagnostico por imágenes y el tratamiento de algunas enfermedades. Es nuestro mayor deseo que esta obra contribuya a la excelencia de nuestro sistema de educación médica superior y que permita cubrir el vació literario existente, relacionado con la interacción de estas dos ciencias, particularmente en este momento histórico en el que nuestro país se encuentra enfrascado en la universalización y diversificación del horizonte de la enseñanza médica.

CAPÍTULO I

Física del sistema óseo-muscular

I- Mecánica. Leyes de Newton.

Las descripciones modernas del movimiento comienzan con una definición cuidadosa de magnitudes como el desplazamiento, el tiempo, la velocidad, la aceleración, la masa y la fuerza. Sin embargo, hasta hace unos 400 años el movimiento se explicaba desde un punto de vista muy distinto. Por ejemplo, los científicos razonaban —siguiendo las ideas del filósofo y científico griego Aristóteles— que una bala de cañón cae porque su posición natural está en el suelo; el Sol, la Luna y las estrellas describen círculos alrededor de la Tierra porque los cuerpos celestes se mueven por naturaleza en círculos perfectos. El físico y astrónomo italiano **Galileo Galilei* reunió las ideas de otros grandes pensadores de su tiempo y empezó a analizar el movimiento a partir de la distancia recorrida desde un punto de partida y del tiempo transcurrido. Demostró que la velocidad de los objetos que caen aumenta continuamente durante su caída. Esta aceleración es la misma para objetos pesados o ligeros, siempre que no se tenga en cuenta la resistencia del aire (rozamiento).

**Galileo Galilei (1564-1642), físico y astrónomo italiano que descubrió las leyes que rigen la caída de los cuerpos y el movimiento de los proyectiles. En 1589 trabajó como profesor de matemáticas en Pisa, donde se dice que demostró ante sus alumnos el error de Aristóteles, que afirmaba que la velocidad de caída de los cuerpos era proporcional a su peso, dejando caer desde la Torre inclinada de esta ciudad dos objetos de pesos diferentes. Sostenía que la Tierra giraba alrededor del Sol, lo que contradecía la creencia de que la Tierra era el centro del Universo. Se negó a obedecer las órdenes de la Iglesia católica para que dejara de exponer sus teorías, y fue condenado a reclusión perpetua. En la historia de la cultura, Galileo ha pasado a representar el símbolo de la lucha contra la autoridad y por la libertad en la investigación.*

A partir de 1665, cuando tenía 23 años, el matemático y físico británico Isaac Newton mejoró este análisis al definir la fuerza y la masa y, relacionarlas con la aceleración, de esta manera se desarrollaron los principios de la *Mecánica*, que es la rama de la física que se ocupa del movimiento de los objetos y de su respuesta a las fuerzas. Con la formulación de las tres leyes del movimiento, Isaac Newton estableció las bases de la dinámica [16].

I.I-La primera ley de Newton

Afirma que si la suma vectorial de las fuerzas que actúan sobre un objeto es cero, el objeto permanecerá en reposo o seguirá moviéndose a velocidad constante. El que la fuerza ejercida sobre un objeto sea cero no significa necesariamente que su velocidad sea cero. Si no está sometido a ninguna fuerza (incluido el rozamiento), un objeto en movimiento seguirá desplazándose a velocidad constante.

I.II-La segunda ley de Newton

Relaciona la fuerza total y la aceleración. Una fuerza neta ejercida sobre un objeto lo acelerará, es decir, cambiará su velocidad. La aceleración será proporcional a la magnitud de la fuerza total y tendrá la misma dirección y sentido que ésta. La constante de proporcionalidad es la masa ***m*** del objeto

$$F=ma$$

En el Sistema Internacional de unidades (conocido también como **SI**), la aceleración ***a*** se mide en metros por segundo cuadrado, la masa ***m*** se mide en kilogramos, y la fuerza ***F*** en newtons.

Un newton se define como la fuerza necesaria para suministrar a una masa de 1 kg una aceleración de 1 metro por segundo cada segundo; esta fuerza es aproximadamente igual al peso de un objeto de 100 gramos. Un objeto con más masa requerirá una fuerza mayor para

una aceleración dada que uno con menos masa. Lo asombroso es que la masa, que mide la inercia de un objeto (su resistencia a cambiar la velocidad), también mide la atracción gravitacional que ejerce sobre otros objetos.

El rozamiento, generalmente, actúa como una fuerza aplicada en sentido opuesto a la velocidad de un objeto. En el caso de deslizamiento en seco, cuando no existe lubricación, la fuerza de rozamiento es casi independiente de la velocidad.

Cuando hay rozamiento, la segunda ley de Newton puede ampliarse a

$$F_{\text{efectiva}} = F - F_{\text{rozamiento}} = ma$$

I.III-La tercera ley de Newton

Afirma que cuando un objeto ejerce una fuerza sobre otro, este otro objeto ejerce también una fuerza sobre el primero. La fuerza que ejerce el primer objeto sobre el segundo debe tener la misma magnitud que la fuerza que el segundo objeto ejerce sobre el primero, pero con sentido opuesto. Por ejemplo, en una pista de patinaje sobre hielo, si un adulto empuja suavemente a un niño, no sólo existe la fuerza que el adulto ejerce sobre el niño, sino que el niño ejerce una fuerza igual pero de sentido opuesto sobre el adulto. Sin embargo, como la masa del adulto es mayor, su aceleración será menor.

La tercera ley de Newton también implica la conservación del momento lineal, el producto de la masa por la velocidad. En un sistema aislado, sobre el que no actúan fuerzas externas, el momento debe ser constante.

Las leyes de la mecánica clásica o mecánica Newtoniana tienen una importante implicación en la biología humana, en particular en el sistema esquelético-muscular.

II- Física del sistema óseo

Es común pensar en los huesos como una parte inerte del cuerpo y que una vez que alcanza su tamaño adulto, éstos ya no cambian. La realidad es otra: el hueso es un tejido

vivo que, al igual que los otros tejidos del cuerpo, debe nutrirse para estar en buenas condiciones, de lo cual se encargan los osteocitos, que son células óseas distribuidas en este tejido.

Al proceso continuo de destrucción el tejido viejo y crear el nuevo se le llama remodelación. La *remodelación* ósea es llevada a cabo por los osteoclastos, que son las células encargadas de la destrucción del tejido viejo y los osteoblastos, que construyen el nuevo. La remodelación ósea es un trabajo muy lento, de forma tal que tenemos el equivalente de un nuevo esqueleto cada siete años aproximadamente.

Mientras el cuerpo es joven y crece, la principal actividad la tienen los osteoblastos, mientras que después de los cuarenta años los osteoclastos son los más activos; esto explica por qué las personas se achican a medida que envejecen. Estos procesos son graduales y lentos, excepto en los primeros años de vida en los que el crecimiento es muy rápido y después de los ochenta años en los que las personas decrecen rápidamente.

VARIEDAD DE TEJIDO ÓSE

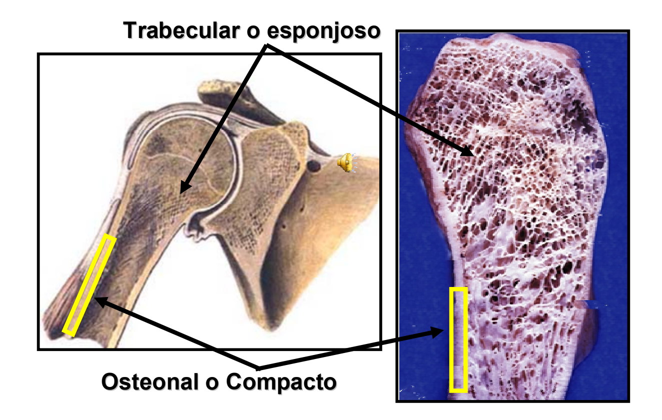


Figura 1-Se muestra un corte transversal de la cabeza del fémur donde el tejido óseo es esponjoso; en el centro del fémur el tejido es compacto, así como en la superficie

Los principales constituyentes del hueso son: Hidrógeno H(3.4%), Carbono C(15.5%), Nitrógeno N(4.0%), Oxigeno 0(44.0%), Magnesio Mg(0.2%), Fósforo P(10.2%), Azufre

S(0.3%), Calcio, Ca(22.2%) y otros (0.2%), que componen tanto el llamado colágeno óseo como el mineral óseo. El colágeno óseo es menos denso que el mineral óseo, desempeña el papel de pegamento del mineral óseo y es el que proporciona la elasticidad de los huesos. El mineral óseo esta formado por hidroxiapatita de calcio: $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ en cristales cilíndricos con diámetros de 20 a 70 x 10^{-10}m y longitudes de 50 a 100 x 10^{-10} m. Cuando el colágeno es retirado del hueso, éste es tan frágil que se rompe con los dedos.

Si se corta por la mitad un hueso, puede verse que el tejido óseo se presenta en dos tipos diferentes: sólido o compacto y esponjoso o trabecular, como se ilustra en la figura 1.

El *tejido esponjoso* y el compacto son químicamente iguales; sólo se diferencian en su densidad volumétrica, es decir, una masa dada de tejido óseo esponjoso ocupa un mayor volumen que la misma masa formando tejido óseo compacto.

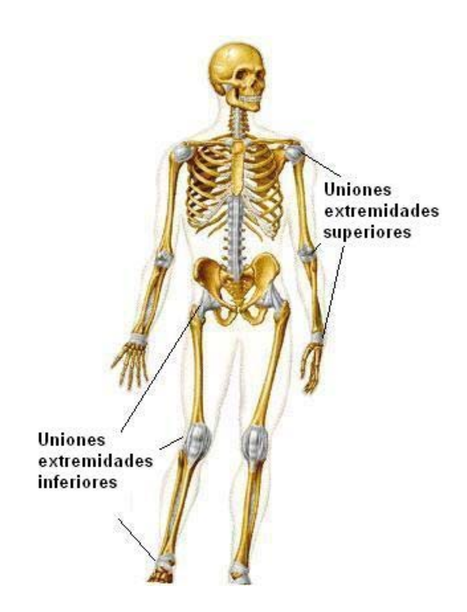


Figura. 2- Esqueleto humano. Se puede ver que debido a las uniones de los huesos, éstos permiten además del soporte, la locomoción.

El *tejido compacto* se encuentra principalmente en la parte superficial así como en la parte central de los huesos largos, mientras que el esponjoso se encuentra en los extremos [17]. En el cuerpo humano, los huesos tienen seis funciones que cumplir y para las cuales están

diseñados óptimamente; éstas son: soporte, locomoción, protección de órganos, almacén de componentes químicos, alimentación y transmisión del sonido. La función de soporte es muy obvia en las piernas: los músculos se ligan a los huesos por tendones y ligamentos y el sistema de huesos y músculos soporta el cuerpo entero. Debido a que los huesos forman un soporte constituido por uniones de secciones rígidas, como se ve en la figura 2, puede llevarse a cabo la locomoción; si se tratara de una sola pieza rígida no habría posibilidad de movimiento. Es por esto que las articulaciones entre los huesos desempeñan un papel tan importante. Las partes delicadas del cuerpo, como son el cerebro, la médula espinal, el corazón y los pulmones, deben ser protegidas de golpes que las puedan dañar; los huesos que constituyen el cráneo, la columna vertebral y las costillas cumplen esta función, como se observa en la figura 2. Las vigas que forman la parte medular de un edificio son sometidas a pruebas mecánicas que determinan su resistencia ante las fuerzas a las que pueden estar sujetas y, que se reducen a las fuerzas de tensión, compresión y torsión. Estas mismas pruebas se utilizan para obtener la resistencia de los huesos, la cual no sólo depende del material con el que están constituidos sino de la forma que tienen. Para efectuar las pruebas de resistencia mecánica se usa una muestra de material en forma de I a la que se aplica la fuerza, como se muestra en la figura 3, durante un tiempo determinado, y luego se analiza la muestra para ver los efectos causados. Se ha encontrado que cuando la fuerza se aplica en una dirección arbitraria, con un cilindro hueco se obtiene el máximo esfuerzo ocupando una mínima cantidad de material y es casi tan fuerte como un cilindro sólido del mismo material. Si hablamos en particular del fémur, como las fuerzas que soporta pueden llegar en cualquier dirección, la forma de cilindro hueco en la cabeza y sólido en el centro del hueso es la más efectiva para soportarlas.

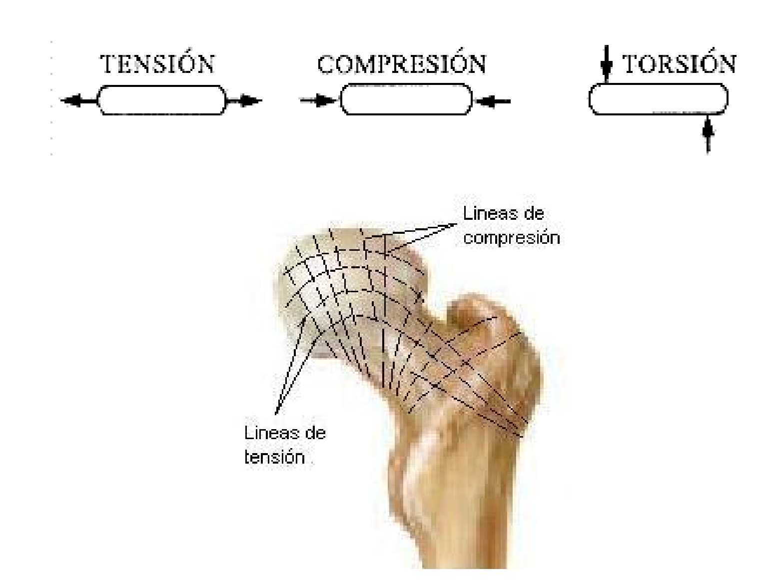


Figura 3. Las pruebas de resistencia mecánica a las que se someten los huesos son las de tensión, compresión y torsión que se ilustran aquí. En la cabeza del fémur se forman líneas de tensión y de compresión debido al peso qué soporta.

Además, el diseño trabecular en los extremos del hueso no es producto de la casualidad, está optimizado para las fuerzas a las que se somete el hueso. En la figura 3 se muestran las líneas de fuerza de tensión y compresión en la cabeza y el cuello del fémur debidas al peso que soporta.

El hueso está compuesto de pequeños cristales minerales atados a una matriz de colágeno flexible. Estos componentes tienen propiedades mecánicas diferentes, sin embargo, la combinación produce un material fuerte como el granito en compresión y 25 veces más fuerte que el granito bajo tensión.

Material	Esfuerzo de compresión para romperse **(N/mm^2)	Esfuerzo de tensión para romperse (N/mm^2)	*Modulo de Young de elasticidad (x 10^2 N/mm^2)
Acero duro	552	827	2070
Granito	145	408	517
Concreto	21	2.1	165
Roble (madera)	59	117	110
Porcelana	552	55	----
Hueso compacto	170	120	179
Hueso trabecular	22	---	0.76

Tabla 1-Comparación de la fortaleza del hueso con otros materiales

Como puede observarse del cuadro 1, es difícil que un hueso se rompa por la acción única de la fuerza de compresión, en general suele romperse por una fuerza combinada de torsión y compresión,

---

**Thomas Young (1773 -1829), físico, médico y egiptólogo británico. Realizó estudios de materiales proponiendo una medida de la rigidez de diferentes materiales conocida en la actualidad como módulo de Young.*

***Presión, en mecánica fuerza por unidad de superficie. En el Sistema Internacional de unidades (SI), la presión se expresa en newton por metro cuadrado; un newton por metro cuadrado es un pascal (Pa).*

A continuación exponemos un ejemplo que evidencia las consecuencias de algunas de estas fuerzas: Si una persona brinca o cae de una altura y cae sobre sus pies, hace un gran esfuerzo sobre los huesos largos de sus piernas. El hueso más vulnerable es la tibia y el esfuerzo sobre este hueso es mayor en el punto donde el área transversal es mínima: precisamente sobre el tobillo. La tibia se fractura si se aplica una fuerza de compresión de aproximadamente 50 000 N. Si la persona cae sobre ambos pies la fuerza máxima que puede tolerar es 2 veces este valor, es decir, 100 000 N, que corresponde a 130 veces el peso de una persona de 75 kg de peso.

La fuerza ejercida sobre los huesos de las piernas es igual a la masa del sujeto multiplicada por la aceleración:

$$F = m\,a$$

Si la persona cae de una altura **H**, partiendo del reposo alcanza, al tocar el suelo, una velocidad de:

$$v = \sqrt{2gH}$$

De la mecánica, sabemos que la aceleración promedio a necesaria para parar un objeto que se mueve con una velocidad ***v*** en una distancia **h** es:

$$a = \frac{v^2}{2h}$$

Sustituyendo el valor de ***v²*** se obtiene:

$$a = \frac{2gH}{2h} = g\,\frac{H}{h}$$

De modo que la fuerza que se ejerce para que la persona se detenga en el suelo es:

$$F = Ma = Mg\frac{H}{h} = w\frac{H}{h}$$

w es el peso de la persona

$\frac{H}{h}$ es la razón de la altura desde la cual cae la persona y la distancia a la que se detiene.

Si la persona que cae no dobla sus tobillos ni sus rodillas, **h** será del orden de 1 cm. Si **F** no es mayor que 130 **w** (130 veces su peso), la altura máxima de caída será:

$$H = \frac{Fh}{w} = \frac{(130w)\,h}{w} = 130\,(0.01) = 1.3\text{m}$$

de modo que si cae de una altura de 1.3 m sin amortiguar la caída doblando sus rodillas ni tobillos puede resultar fractura de la tibia.

Si se flexionan las rodillas durante la caída, la distancia **h** en la que se desacelera el cuerpo alcanzando una aceleración cero puede aumentar 60 veces, de manera que la altura desde la que se puede efectuar el salto es **H** = 60 X 1.3 m = 78 m; en este caso la fuerza de desaceleración se ejerce casi enteramente por los tendones y ligamentos en vez de los huesos largos, estos músculos son capaces de resistir sólo aproximadamente 1/20 de la fuerza necesaria para la fractura de los huesos, de modo que la altura de **H** = 4 m es la máxima segura, siempre y cuando se doblen las rodillas y tobillos. Los huesos son menos fuertes bajo tensión que bajo compresión. La ciencia que se encarga de modelar y explicar armónicamente todos los fenómenos físicos en el cuerpo humano se denomina *Biomecánica.* La biomecánica, como una de las ciencias biológicas de nuevo tipo, comienza a acercarse a las ciencias exactas por los métodos de investigación. La biomecánica general, como parte de la biofísica que incluye el estudio de los biosistemas internos del

organismo, surgió en el punto de unión de las esferas físico-matemática y biológica del conocimiento; por lo que biomecánica es el estudio de los efectos de las fuerzas mecánicas en los organismos vivos. Si bien existen muchos tipos de fuerzas los efectos producidos por éstas se describen rigurosamente mediante las tres leyes generales del movimiento formuladas por Sir Isaac Newton (1643-1727) y que enunciamos en el comienzo de este capítulo [18].

Muchos de los conocimientos generados por la biomecánica se basan en lo que se conoce como modelos biomecánicos. Estos modelos permiten realizar predicciones sobre el comportamiento, resistencia, fatiga y otros aspectos de diferentes partes del cuerpo cuando están sometidos a unas condiciones determinadas. Así, por ejemplo, esta disciplina se ocupa de determinar la *resistencia* de un material biológico ante la ejecución de una fuerza que actúa sobre este. Las propiedades biomecánicas de los huesos responden a las fuerzas aplicadas sobre su superficie siguiendo un patrón característico. La primera fase es elástica y depende de la rigidez del hueso. En esta fase, la deformación es temporal y se mantiene solo durante el tiempo de aplicación de la fuerza tras lo cual, el hueso recupera su forma original. Si la fuerza aumenta, se entra en una fase plástica y el hueso, aunque se recupera parcialmente, queda deformado. Por último cuando la fuerza aplicada es superior a la resistencia del tejido se produce la fractura.

La respuesta del tejido óseo frente a las fuerzas que se aplican sobre su superficie dependerá del tipo de fuerza, del tipo de hueso, así como de la densidad, arquitectura y composición del tejido óseo. Como señalamos con anterioridad, las fuerzas que pueden actuar sobre el tejido óseo son de tres tipos: tensión, compresión y torsión. Además pueden ser aplicadas de forma perpendicular a la superficie ósea (fuerza normal) o de forma oblicua (fuerza de cizallamiento). Los huesos largos, formados fundamentalmente por tejido óseo

compacto o cortical, son elásticos y poco plásticos. En estos huesos, la resistencia será mayor cuando la fuerza se aplica de forma vertical al sentido de la carga. Cuando la fuerza se aplica de forma oblicua la fase plástica se acorta y el hueso se fractura con más rapidez. En los huesos integrados por tejido óseo esponjoso, la resistencia es mayor cuando la fuerza se aplica a lo largo del eje vertical de las trabéculas vertebrales y también cuando es paralela a los sistemas trabeculares del cuello femoral. Estos huesos, al ser menos densos que los formados por tejido óseo cortical, son menos elásticos y más plásticos, por lo que pueden presentar deformaciones mayores. Así mientras que en los huesos integrados por tejido esponjoso, las fracturas se producen cuando existen variaciones del 7% de su longitud, en los integrados por tejido compacto, las fracturas se producen con variaciones del 2%.[19] La gráfica asociada al estudio de este fenómeno se conoce con el nombre de Curva Tensión Deformación de cuyo estudio es posible inferir el comportamiento del material. Un punto aparte en esta consideración lo representan los materiales viscoelásticos.[20]. Dichos materiales se caracterizan por presentar un comportamiento diferente en el tiempo a pesar de que las condiciones de carga o deformación a las que se les somete permanezcan constantes. Esto quiere decir, por ejemplo, que si el material es sometido a una carga constante, la deformación del material inicialmente ocurre a una cierta velocidad y que con el paso del tiempo de carga mantenida, dicha deformación tiende a ser constante (no experimentar variaciones). Un ejemplo clásico de material viscoelástico lo constituye el cartílago articular que cubre las superficies óseas [21].

III- Física del sistema Muscular

Una propiedad muy general de la materia viviente es la habilidad para alterar su tamaño o medida por contracción o expansión de una zona determinada del organismo. Al hablar de contracciones lo más fácil es asociarlas a músculos y a la contracción del músculo esquelético. Sin embargo es también un músculo el cardíaco o el que rodea las vísceras

huecas, el intestino, por ejemplo. Para ver las diferencias lo primero que hay que pensar es en la función que cumple cada uno. Un músculo esquelético puede levantar un peso y sostenerlo y, con una estimulación adecuada, lograr, con una contracción en masa, la máxima fuerza, manteniendo su función. Figura 4. Una contracción en masa es impensable en el músculo cardíaco cuya función es impulsar la sangre. Debe contraerse siguiendo el orden determinado. El caso del intestino una de sus funciones es impulsar el contenido intestinal hacia el recto y las contracciones serán progresivas. Pese a sus diferencias, estos tres músculos tienen algo en común: las proteínas contráctiles y que son tejidos excitables (generan potenciales de acción)



*Figura 4- Músculos de brazos y cuello. *Leonardo Da Vinci*

Un grupo de ellos tiene asignado como trabajo el llevar a cabo la locomoción [22].

Leonardo da Vinci (1452-1519), artista florentino y uno de los grandes maestros del renacimiento, famoso como pintor, escultor, arquitecto, ingeniero y científico. Sus investigaciones científicas (sobre todo en las áreas de anatomía, óptica e hidráulica) anticiparon muchos de los avances de la ciencia moderna.

Los músculos son traductores que convierten la energía química en energía eléctrica, energía térmica y/o energía mecánica útil. Suponen aproximadamente el 35% del peso del cuerpo. Aparecen en diferentes formas y tamaños, difieren en las fuerzas que pueden ejercer y en la velocidad de su acción; además, sus propiedades cambian con la edad de la persona, su medio ambiente y la actividad que desarrolla. Desde el punto de vista anatómico se pueden clasificar de muchas maneras, dependiendo de su función, innervación, localización en el cuerpo, etc.

Quizá la clasificación histológica es la más sencilla y clara, y distingue dos clases de músculos: lisos y estriados (figura 5). Los estriados, vistos al microscopio, parecen alternar bandas oscuras y claras distribuidas en forma regular; las fibras son largas. Los lisos consisten en fibras cortas que no presentan estrías. [23]

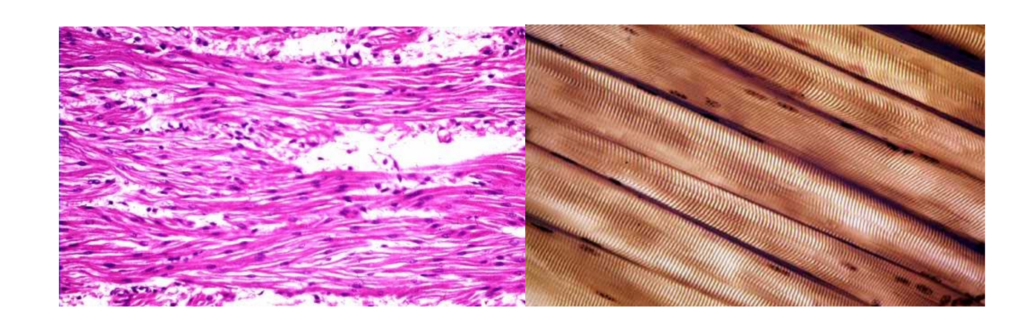


Figura 5- El músculo liso humano, también llamado músculo visceral o involuntario (izquierda). El músculo estriado (derecha) es aquél que se relaciona con el esqueleto y el movimiento.

El estudio de los músculos desde el punto de vista físico abarca muchos campos. El estudio de los músculos plantea un problema de las definiciones de trabajo, fuerza, tensión y presión. En física Trabajo o energía es:

$$Trabajo = fuerza \times espacio$$

¿Un brazo que sostiene un peso y lo mantiene en una posición fija (contracción isométrica) no hace un trabajo y gasta una energía? Por supuesto que sí. Estirado inicialmente al

máximo el tendón, contraído el bíceps, este seguirá haciendo un trabajo y gastando energía pero calórica.

Ahora habrá que diferenciar presión de tensión y fuerza de tensión. Sabemos que presión es

$$Presión = fuerza \ . \ superficie^{-2}$$

El término tensión es algo un poco más complejo. Así, de la tensión superficial se deriva la Ley de Laplace (ver capítulo II) y se aplica en vaso sanguíneo cuando hay un equilibrio entre la tensión de la pared del vaso y la presión arterial, de modo que radio **r** se mantenga constante. Así, si a la Ley de Laplace se la escribe como:

$$t = P \ . \ r$$

Simplemente se dirá que la tensión es una fuerza que se ejerce sin que se modifique la longitud. Al sostener un peso a una altura constante, el músculo está en tensión.

Es frecuente hablar de *tensión emocional* y otros conceptos semejantes que no tienen, obviamente, unidades físicas. Es habitual en la jerga médica hablar de tensión arterial al tomar la presión con un esfigmomanómetro. Aquí fundamentalmente trataremos el problema de la locomoción, que corresponde a los músculos estriados los cuales tienen, en los extremos, sus fibras atadas por tendones que los unen a los huesos, por lo que se conocen como *músculos del esqueleto*. Hablar de locomoción es hablar de movimiento, es decir, de mecánica. Lo primero que haremos será distinguir entre un cuerpo en movimiento y otro inmóvil. Un cuerpo inmóvil no cambia de lugar al transcurrir el tiempo, mientras que uno en movimiento sí lo hace. Podemos pensar que un cuerpo inmóvil está en equilibrio, pero ¿qué es el equilibrio? Cuando hablamos de equilibrio en física, lo que estamos diciendo es que no hay fuerza neta actuando sobre el cuerpo, lo que implica que puede estar en movimiento y su velocidad ser constante; si la velocidad es cero, el cuerpo estará inmóvil. La fuerza neta es cero cuando la suma de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es cero, lo que se representa como: $\sum F = 0$, **F** representa a cada una de las fuerzas que actúan sobre el

cuerpo y tiene carácter vectorial, es decir, posee magnitud, dirección y sentido; en estas tres particularidades deben sumarse las fuerzas. Para saber si un cuerpo está o no en equilibrio podemos hacer una representación gráfica de las fuerzas que actúan sobre él; por ejemplo, consideremos que las fuerzas que están actuando sobre el cuerpo están dadas por: $\mathbf{F_1}$, $\mathbf{F_2}$, $\mathbf{F_3}$ **y** $\mathbf{F_4}$ como se muestra en la figura 6, donde el tamaño de cada una es proporcional a su longitud, la dirección y el sentido están representados por la punta de la flecha. Para sumarlas gráficamente las dibujamos de manera consecutiva, de modo que se forma un polígono; si éste es cerrado, entonces la suma de las fuerzas es cero y el cuerpo está en equilibrio; si el polígono no es una figura cerrada, habrá una fuerza neta actuando sobre el cuerpo. Hay un caso que debe ser considerado: si las fuerzas que actúan sobre el cuerpo tienen la misma magnitud y dirección pero sentidos contrarios, la suma vectorial es cero; sin embargo, el cuerpo estará en equilibrio sólo si están aplicadas sobre la misma línea, de otra forma se produce un giro en el cuerpo. Si esto ocurre, decimos que la fuerza (cada una) produce una torción τ en el cuerpo dada por: $\tau = \mathbf{F.r.sen}\ \boldsymbol{\theta}$, donde **F** es la magnitud de la fuerza, **r** la distancia del centro de giro del cuerpo al punto de aplicación de la fuerza y **θ** es el ángulo que forman **r** y **F.**

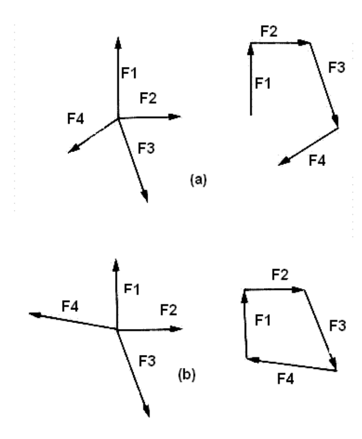


Figura 6- (a) Cuatro vectores de fuerza actuando sobre un objeto, cuya suma por el método gráfico resulta ser diferente del cero, provocan que el cuerpo no esté en equilibrio. b) Cuatro vectores actuando sobre un cuerpo, cuya suma es cero, provocan que el cuerpo esté en equilibrio.

Por lo expresado hasta aquí se puede concluir, que para garantizar que el cuerpo esté en equilibrio, se deben cumplir simultáneamente dos condiciones: que la suma de las fuerzas actuando sobre él sea cero y que la suma de las torciones sea cero, es decir: $\sum F = 0$ y $\sum \tau = 0$. Lo primero garantiza que no hay movimiento de translación, y lo segundo que no hay giro o rotación. Otra aplicación de las condiciones de equilibrio se da en el cálculo de la fuerza ejercida por los músculos, como el bíceps mostrado en la figura 7, donde se conoce el peso del antebrazo A=1.5 kgf y el peso que sostiene W=5 kgf.

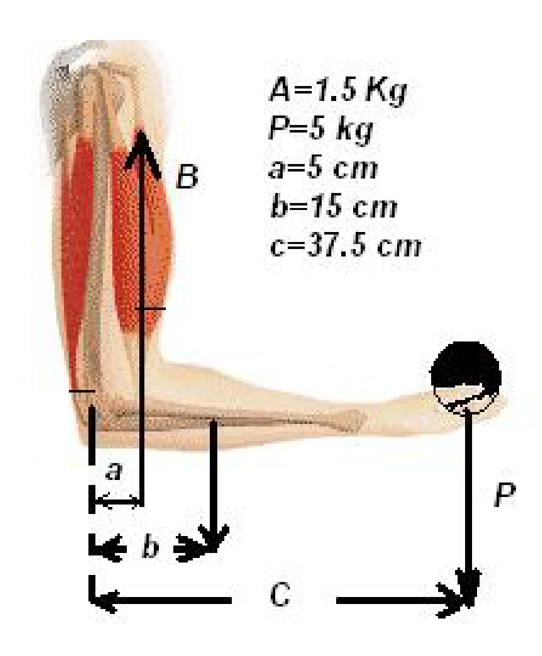


Figura 7-Fuerzas producidas en el antebrazo al sostener un peso P.

Aplicando la condición de equilibrio: $\sum \tau = 0$ y considerando que el centro de giro sería la articulación del codo, se tiene:

W (37.5) + A (15) - B (5) = 0

187.5 + 22.5 = 5B

B = 42 Kgf

por lo que: B = 42 Kgf

que es la fuerza ejercida por el bíceps. Es frecuente que los músculos ejerzan fuerzas mucho mayores que las cargas que sostienen.

Otro concepto importante es el de centro de gravedad. Éste coincide con el centro geométrico si el cuerpo es perfectamente simétrico y su masa está uniformemente distribuida; en estos casos es fácil calcularlo.

El concepto de centro de gravedad es útil en terapia física ya que un cuerpo apoyado sobre su centro de gravedad se encuentra en equilibrio y no cambia su posición a menos que actúe una fuerza sobre él. Una persona que está de pie tiene su centro de gravedad en la región pélvica, pero si se dobla hacia delante la localización del centro de gravedad variará, haciendo que la persona gire.

Cuando una persona carga un cuerpo pesado, tiende a moverse en el sentido opuesto al que se encuentra el objeto, para equilibrar el centro de gravedad de los dos juntos: así evita caer.

Cuando varias fuerzas actúan sobre el cuerpo, una forma de simplificar el problema de su movimiento es considerar que todas se aplican en un solo punto, el centro de masa del cuerpo, que puede estar localizado dentro o fuera de éste. El centro de masa es un punto donde teóricamente se concentra toda la masa del cuerpo y está localizado en un punto espacial que nos permite describir el movimiento del cuerpo; por ejemplo, una rueda de coche que rodamos sobre una línea recta: su centro de masa estaría ubicado en el centro, a pesar de no haber masa ahí; dicho punto se mueve en línea recta permitiéndonos describir el movimiento de la rueda del modo más simple posible.

En física se consideran tres casos de equilibrio: estable, inestable e indiferente. El estable es aquél que tiene un cuerpo que al moverse tiende siempre a regresar a su posición

original, como sería el caso del péndulo de un reloj: siempre tiende a volver a la posición vertical. El inestable corresponde a aquellos cuerpos que al moverse fuera de su posición de equilibrio no regresan a ella; un ejemplo sería el de un plato sobre un lápiz (malabarismo). El equilibrio indiferente es el de aquellos cuerpos que se mueven de su posición de equilibrio y regresan a la condición de equilibrio en cualquier otra posición, por ejemplo, un hombre que camina, cada vez que se detiene está en equilibrio. Cuando un músculo es estimulado, se contrae. Si el músculo se mantiene con longitud constante desarrolla una fuerza, mientras que si mueve un peso se contrae y hace trabajo. Las dos situaciones más simples para estudiar son a) longitud constante (isométrica) y b) fuerza constante (isotónica) [24]. Si el músculo es estimulado por medio de corriente eléctrica, impulsos mecánicos, calor, frío, etc., ocurre una serie de contracciones, separadas por relajamientos entre cada estímulo. Si los estímulos se repiten antes de que ocurra la relajación, la contracción se mantiene estacionaria; esto se conoce como tétano. Eventualmente todos los músculos sufren de fatiga y su contracción falla cuando haya un estímulo presente. Es necesario decir que sólo las contracciones isotónicas realizan trabajo. Los músculos estriados en general pueden desarrollar grandes fuerzas para una carga dada, como lo vimos anteriormente, en particular los músculos esqueléticos desarrollan fuerzas mayores que las cargas que soportan; sin embargo, las cargas pueden moverse mucho más de lo que se contrae el músculo. [25]

Cuando un músculo está trabajando produce cierta cantidad de calor debida a la conversión de energía química en trabajo mecánico. Experimentalmente esto se mide a través del aumento en la temperatura del cuerpo. Por lo anterior, una persona que tiene una gran energía puede desarrollar una gran cantidad de trabajo; para tener una gran energía se debe comer bien, ya que la energía química almacenada en los alimentos puede ser completamente transferida al organismo. La energía de un cuerpo es la capacidad que tiene

para desarrollar un trabajo. Desde el punto de vista de la física, existen varias formas de energía: mecánica, química, eléctrica, magnética, etc.; sin embargo, pueden transformarse de una a otra en un sistema como el del organismo humano, por ejemplo, en un sistema aislado (aquél que no tiene interacción con sus alrededores), la energía se transforma sin que exista ninguna pérdida o ganancia en la cantidad total inicial; es por ello que se dice que la energía se conserva. Éste es, quizá, el principio más importante de la física.

Cuando se aplica una fuerza **F** a un cuerpo de modo que lo desplace una distancia **S**, se dice que la fuerza ha desarrollado un trabajo dado por: $W = F \cdot S \cdot \cos\theta$ donde ***θ*** es el ángulo que hace la fuerza F con la línea de desplazamiento del cuerpo. Si el cuerpo se mueve en la misma línea en la que se aplica la fuerza, se tiene que el trabajo total realizado es: $W = F \cdot S$, medido en N.m (Newtons por metro) o J (Joules).

Si a un cuerpo, inicialmente en reposo, se le aplica una fuerza constante, es decir una aceleración constante, ya que la fuerza está dada por el producto de la masa del cuerpo por la aceleración que se le imprime: **F = m.a**; al transcurrir un tiempo **t** habrá recorrido una distancia

dada por $a \cdot \frac{t^2}{2}$ de modo que el trabajo estará dado por:

$$W = F \cdot S = (m \cdot a) \cdot \left(a \cdot \frac{t^2}{2}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) m \cdot (a \cdot t)^2 = \left(\frac{1}{2}\right) m \cdot v^2$$

ya que la velocidad se encuentra como **v = a.t.** A esta cantidad se le conoce como *energía cinética* del cuerpo, la cual claramente es igual al trabajo desarrollado por él.

La cantidad de trabajo desarrollado por los músculos y las piernas de un corredor está dado por: $W = F \cdot S = \left(\frac{1}{2}\right) m \cdot v^2$ donde **F** es la fuerza muscular, **S** la distancia recorrida en cada zancada del corredor y **m** la masa de la pierna.

Al caer de una altura h, un cuerpo está sujeto a la acción de la gravedad y adquiere una velocidad que depende de la constante gravitacional $g : v = \sqrt{2gh}$, al sustituirla en la ecuación para la energía cinética se tiene:

$$E_c = 2 \cdot \frac{mgh}{2} = mgh$$

que es la energía que tenía almacenada el cuerpo a la altura **h**, antes de iniciar su caída, y se le conoce como *energía potencial* del cuerpo. Muchos de los músculos y huesos del cuerpo actúan como palancas, las cuales se clasifican en tres clases. Las palancas de la primera clase son aquellas en las que el punto de apoyo se encuentra entre el punto de aplicación de la fuerza (en este caso de la fuerza muscular) y el punto de aplicación del peso que se quiere mover; esta clase de palancas son las que menos se presentan en la realidad. Las de segunda clase son aquellas en las que el peso se encuentra entre el punto de apoyo y la fuerza muscular; mientras que en las de tercera clase, que son las más frecuentes, el punto de aplicación de la fuerza muscular se encuentra entre los puntos de aplicación del peso y del apoyo (esto se ilustra en la Figura 8). Es frecuente que después de cargar un objeto pesado, se sufra de dolor en la región lumbar, lo que se debe a la mala posición que se adopta para levantar el peso. Se han hecho medidas de la presión en los discos que separan las vértebras usando un transductor calibrado conectado a una aguja hueca que se inserta en el centro gelatinoso de un disco intervertebral para un adulto que carga un peso adoptando diferentes posiciones. La posición erecta que adopta la persona sin carga extra provoca una presión en el disco lumbar de aproximadamente 5 atmósferas;

si la carga es de aproximadamente 20 kg, distribuida en igual forma en cada mano a los lados del cuerpo, la presión alcanza las 7 atmósferas una vez que la persona está erecta. Al momento de levantar la carga, si la persona *dobla* las rodillas, la presión alcanzará 12 atmósferas, mientras que si no las dobla puede llegar hasta 35 atmósferas (1 atm es la presión ejercida por la atmósfera terrestre al nivel del mar), por lo que es conveniente doblar las rodillas cada vez que se cargue un peso.

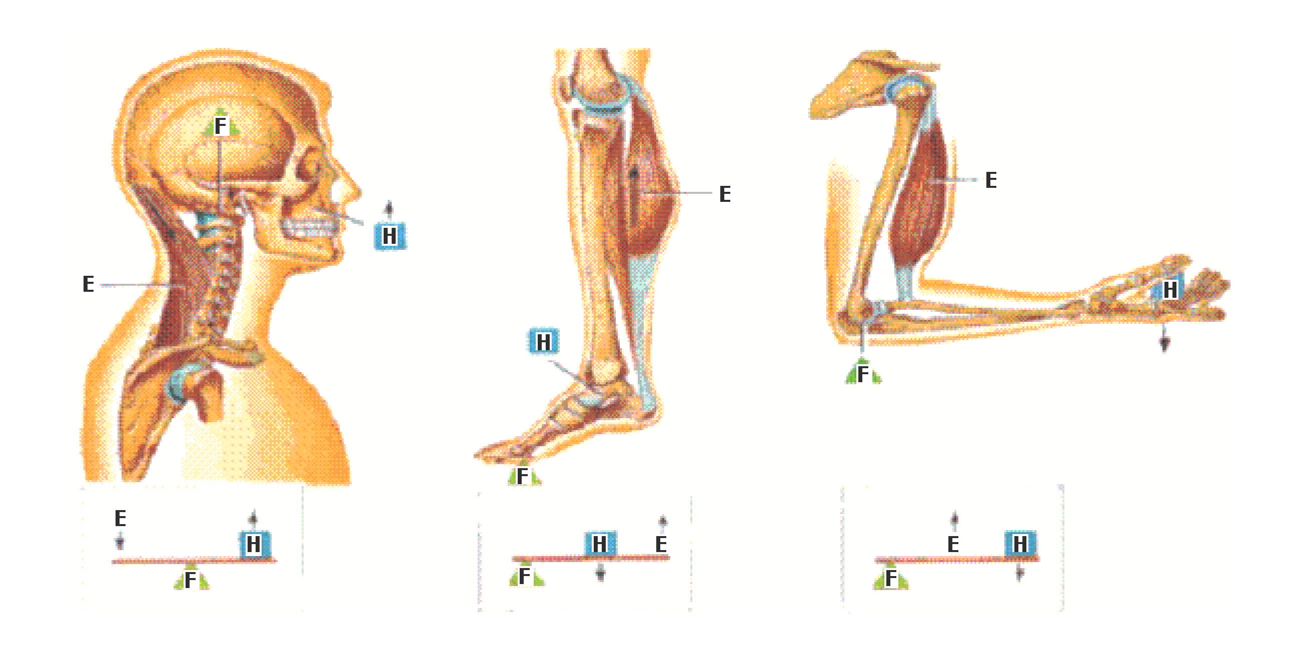


Figura 8. Las tres clases de palancas que se producen en el cuerpo humano. ***H*** *es una fuerza que ejerce el peso,* ***E*** *es la fuerza muscular y* ***F*** *la fuerza de reacción.*

IV-Aplicaciones terapéuticas relacionadas con la implementación de las leyes de la mecánica.

IV.I- Ergonomía, Antropometría y Biomecánica

Desde la antigüedad, los científicos han estudiado el trabajo para explicarlo y/o para mejorar su rendimiento y, así por ejemplo, Leonardo Da Vinci en sus "Cuadernos de anatomía" (1498) investiga sobre los movimientos de los segmentos corporales, de tal manera que se puede considerar como precursor directo de la biomecánica, al igual que los análisis de

**Alberto Durero* recogidos en "El arte de la medida" (1512) y que sirvieron de inicio a la moderna Antropometría, donde se busca la adecuación de las profesiones a las posibilidades de las personas.

Pero lo cierto es que solamente será, a partir de la llamada Revolución Industrial, cuando se realicen las primeras investigaciones científicas en este campo, por lo que la evolución tecnológica ha sido la que ha puesto de relieve la necesidad de optimizar las funciones humanas.

Surge de esta manera la *ergonomía* que es la adaptación de la estación de trabajo. Para poder adaptar la estación de trabajo necesitamos conocer las medidas de las personas y cuales son sus alcances en cuanto a rango de movimientos se refiere [26].

Por ello, la *Antropometría* y la *Biomecánica* se han encargado de obtener datos de los seres humanos en cuanto a medidas del cuerpo, como altura total, largo de las piernas, largo de los brazos y manos, ancho de hombros, largo del suelo a la cintura, etc. además de las medidas del cuerpo en movimiento, por ejemplo: largo de los brazos extendidos para determinar alcances, ángulo de movimiento de los hombros, codos, muñecas y dedos para saber hasta donde se puede mover y así diseñar una estación de trabajo en lo que todo su espacio esté dentro de su alcance y colocar ahí sus herramientas y materiales.

Para efectuar un trabajo de la manera más eficiente, el hombre debe establecer con su entorno una relación.

**Alberto Durero (1471-1528), artista alemán, una de las figuras más importantes del renacimiento*

Una limitación posible para que este circuito funcione de manera efectiva reside en la habilidad para utilizar sus huesos, articulaciones y músculos con el fin de mover el cuerpo de la forma deseada. El estudio de las dimensiones del cuerpo, llamado antropometría, representa un aspecto esencial de cualquier investigación ergonómica. La acción de los huesos y las articulaciones se analiza e interpreta en términos de un sistema de palancas complejo, aspecto que se conoce como biomecánica. El propósito es examinar como el hombre lleva acabo y controla su conducta motora y los factores que limitan su desempeño[27].

Los 206 huesos que forman el esqueleto humano llevan acabo una de dos funciones o ambas; unos cuantos protegen órganos vitales del cuerpo de daños mecánicos, ejemplo el esternón; pero la mayoría dan rigidez al cuerpo y le permiten efectuar tareas. Para el ergónomo, los huesos relacionados con el trabajo son los largos de los brazos y las piernas y los largos de los dedos de las manos y pies.

Los huesos se conectan con las articulaciones y permanecen juntos por medio de los ligamentos y los músculos. La dirección y el grado de movimiento dependen de la forma de las superficies de la articulación; por ejemplo: Articulaciones con función de bisagra simple con movimiento en un solo plano (dedos, codo, rodillas); Articulaciones que permiten efectuar movimientos en dos planos (muñeca o tobillo); Articulaciones tipo esfera y cuenca, que permiten un gran rango de movimientos (cadera y hombro) [28].

El trabajo de los músculos esta restringido por los límites de su fuerza y la habilidad para mantener la misma. Hay que diferenciar entre el trabajo dinámico y estético. Se dice que es estético si no ocurre ningún movimiento, ejemplo: cuando se sostiene un peso en la palma de la mano con el brazo extendido pero sin moverse; pero si el brazo se mueve hacia arriba

o hacia abajo, se dice que el antebrazo se mueve y el hombro desarrolla un trabajo dinámico.

Los ergónomos necesitan información acerca de la fuerza muscular para poder sugerir controles y sistemas de movimientos apropiados, para determinar las resistencias de control máximas y optimas; para definir las fuerzas requeridas en diversas tareas manuales y para asegurar las disposiciones adecuadas en el levantamiento o el desplazamiento seguro y eficaz. Los niveles de fuerza humana también son apropiados para el diseño del equipo que se usa en condiciones anormales o especiales, como el viaje al espacio, debido a las restricciones de área. Las acciones musculares que interesan al ergónomo suelen requerir el ejercicio integrado de muchos grupos musculares; por ejemplo: empujar un pedal requiere girar el tobillo, extender la rodilla y la cadera y estabilizar sobre el asiento tanto la pelvis como el tronco. Los factores que se relacionan con la fuerza muscular y que influyen en ella son la edad y el sexo; otros factores adicionales pueden ser el peso y la altura, la posición del cuerpo, la fatiga, el ejercicio, la salud, la dieta, las drogas, las variaciones diurnas, los factores ambientales, la motivación y la ocupación.

El ergónomo debe usar los datos antropométricos para asegurar una relación armónica del hombre con su entorno. Al interactuar con su ambiente, es importante contar con los detalles de las dimensiones de la parte apropiada del cuerpo. Así, la estatura total es importante para diseñar el tamaño de la habitación, la altura de las puertas o las dimensiones de los aparadores; la dimensión de la pelvis y los glúteos limitan el tamaño de los asientos; el tamaño de la mano determina las dimensiones de los controles y de los soportes de descanso.

Las acciones biomecánicas que más interesan son fundamentalmente las de *caminar* y *levantar*. Los rangos de movimiento de las articulaciones varían de persona a persona,

debido a las diferencias antropométricas y al resultado de otros factores, como la edad, el sexo, la raza, la estructura del cuerpo, el ejercicio, la ocupación, la fatiga, la enfermedad, la posición del cuerpo y la presencia o ausencia de ropa.

Uno de los principales supuestos de los cuales la biomecánica parte es que el cuerpo humano se comporta de acuerdo con las leyes mecánicas Newtonianas. Cabe aclarar que no se asume que el cuerpo se considera, o es visto como una maquina, pero si debemos aceptar que la estructura óseo-muscular se comporta como un sistema mecánico en el cual las fuerzas y las cargas aplicadas pueden ser cuantificadas. [29] Como se ha establecido con anterioridad, la mecánica es la parte de la física que estudia el *movimiento* y *equilibrio* de los *cuerpos* (objetos materiales) y las leyes que los rigen.

Para su mejor estudio, la mecánica se divide en dos partes: Dinámica y Estática.

Mecánica	
Dinámica: estudio de las leyes del movimiento de la materia	Estática: Estudio de las leyes del equilibrio de la materia
Mecánica Dinámica	
Cinética: Estudio de las fuerzas que generan (modifican o detienen el movimiento)	Cinemática: Descripción geométrica del movimiento en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración

Tabla 2- Partes fundamentales que estudia la mecánica

Los principales componentes del movimiento humano están determinados por las siguientes premisas

El movimiento es toda acción que permite el desplazamiento desde un lugar a otro y los efectos que de ello resulte. La motricidad es la capacidad de generar movimiento.

El movimiento implica la participación del elemento comando (SNC-SNP) y el elemento ejecutor (músculo).

El elemento anatómico encargado de producir movimiento es el aparato locomotor y se estudia desde el punto de vista biomecánico.

Se puede establecer una correlación entre las partes osteoarticulares/partes blandas y los elementos anatómicos y mecánicos. (tabla 3)

Componentes	*Elementos anatómicos*	*Elementos mecánicos*
Partes osteoarticulares	Huesos	Palancas
	Articulaciones	Charlenas-Goznes
Partes blandas	Músculos	Motores
	Tendones	Cables
	Ligamentos	Refuerzos-Cierres

Tabla 3-Analogía entre elementos anatómicos y sistemas mecánicos

IV.II-Sistemas mecánicos del cuerpo

IV.II.a-Planos del Cuerpo Humano

El plano es una representación imaginaria que pasa a través del cuerpo en su posición anatómica. Los planos se pueden clasificar en [30]

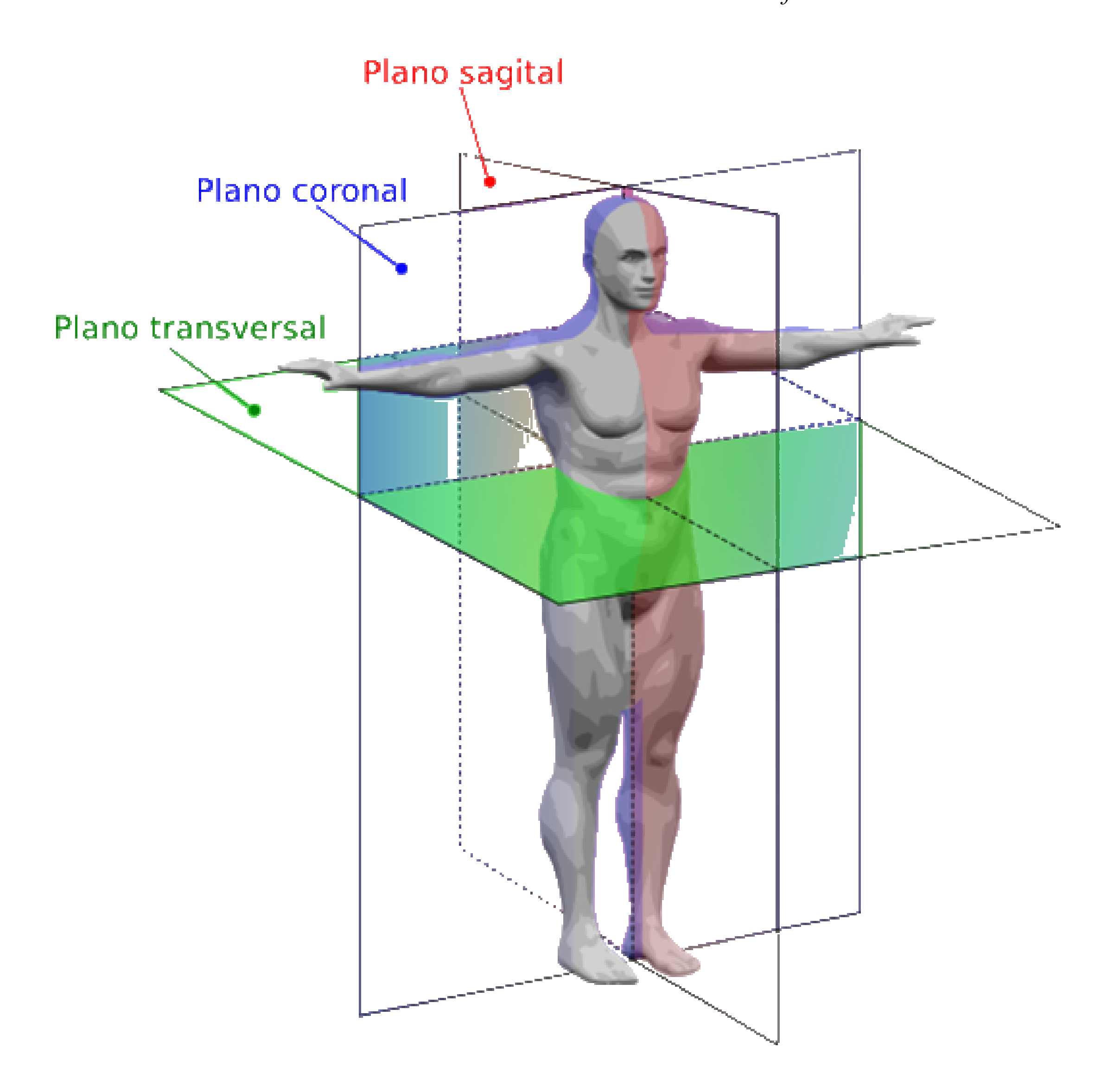


Figura 9. Planos del cuerpo

Plano Medio Sagital: Es el plano que divide imaginariamente al cuerpo en sentido antero posterior a lo largo de la línea media y lo divide en dos partes iguales, derecha e izquierda.

Plano Coronal ó Frontal: Es un plano vertical que pasa a través del cuerpo formando un ángulo recto (de 90°) con el plano medio y divide imaginariamente al cuerpo en dos partes, la anterior o facial y la posterior o dorsal.

Plano Transversal u Horizontal: Es el plano que divide al cuerpo o cualquier parte de él en dos mitades, superior o cefálica e inferior o caudal.

IV.II.b-Ejes del Cuerpo Humano

Los ejes en el ser humano pueden ser conceptualizados como líneas imaginarias que atraviesan el cuerpo y nos ayudan a describir y a comprender mejor la ejecución de los movimientos, los mismos pueden se divididos o agrupados en tres secciones.

Eje Cefalopodal: es el más largo del cuerpo, se representa por una línea imaginaria que va desde las vértebras cervicales al centro de las superficies de apoyo formadas por los pies ubicado perpendicularmente al plano horizontal, estando el sujeto de pie con las extremidades inferiores unidas.

Eje Anteroposterior: Es una línea imaginaria perpendicular al tórax (plano frontal) que lo atraviesa de adelante hacia atrás.

Eje Transversal: Es una línea imaginaria que atraviesa de lado a lado en forma perpendicular al plano sagital.

Plano	***Eje***	***Movimiento***
Medio ó Sagital	Transversal	Flexión y Extensión
Coronal ó Frontal	Antero posterior	**Abducción y **aducción*
Transversal u Horizontal	Cefalopodal	Movimiento de rotación

Tabla 4- Movimientos existentes en los planos y ejes del cuerpo

**Movimiento por el cual un miembro u otro órgano se aleja del plano medio que divide imaginariamente el cuerpo en dos partes simétricas.*

***Movimiento por el cual se acerca un miembro u otro órgano al plano medio que divide imaginariamente el cuerpo en dos partes simétricas.*

IV.II.c-Palancas

La palanca es una máquina simple compuesta por una barra rígida que puede girar libremente alrededor de un punto de apoyo. [31]

- El ensamblaje del movimiento humano se realiza mediante sistemas de palancas músculo-hueso. La tensión de los músculos se aprovecha al actuar en la serie de palancas proporcionadas por los tejidos óseos rígidos. Los componentes óseos actúan como brazos de palanca y las articulaciones constituyen el eje de movimiento; la fuerza depende de la contracción muscular.
- Este complejo mecánico obedece a las leyes de las palancas, reposa en el suelo por medio de apoyos variables y está sometido a la acción de la fuerza gravitatoria y a las leyes del equilibrio.
- Los huesos forman entre sí sistemas de palancas destinadas a moverse alrededor de un eje fijo, denominado punto de apoyo.
- Los músculos constituyen la potencia que mueve la palanca; sus inserciones son los puntos de aplicación de esta potencia.
- La resistencia está constituida por el peso del segmento a utilizar, incrementado, según el caso, por una resistencia externa (pesas, oposición) o interna (ligamentos y músculos antagonistas)

Como quedó establecido en el anterior acápite, existen tres tipos de palancas

Palanca de primera clase. El eje se encuentra entre la resistencia y el esfuerzo.

Palanca de segunda clase. La resistencia se encuentra entre el eje y el esfuerzo.

Palanca de tercera clase. El esfuerzo se encuentra entre el eje y la resistencia.

Se denomina *Brazo de la resistencia* a la distancia perpendicular desde la línea de acción de la resistencia hasta el eje de movimiento de la palanca y *Brazo del esfuerzo a* la distancia perpendicular desde la línea de acción del esfuerzo hasta el eje de movimiento de la palanca.

Tenemos mayor ventaja mecánica cuando el brazo del esfuerzo es mayor al brazo de la resistencia. Un aumento en el largo del brazo del esfuerzo o una disminución en el largo del brazo de la resistencia resulta en mayor ventaja mecánica, facilitando la tarea que se va a ejecutar. Una palanca se encontrará en balance o equilibrio cuando el producto del esfuerzo y el brazo del esfuerzo es igual al producto de la resistencia por el brazo de la resistencia, o sea, cuando la resultante de todas las fuerzas actuantes en el sistema es igual a cero.

IV.II.d-Torque

Es el efecto de una fuerza al causar rotación de una palanca si la fuerza se aplica a cierta distancia del eje de la palanca. Es el producto de una fuerza multiplicado por la distancia perpendicular entre la línea de acción de la fuerza y el eje de rotación. T = F X D. Expresa la efectividad de una fuerza en mover un sistema de palancas. Esa efectividad no dependerá solamente de la magnitud de la fuerza sino también de la distancia a la cual esta actuando esa fuerza.[32]

Principios del torque

- Para que exista equilibrio en una palanca, el torque producido por el esfuerzo deberá ser igual al torque producido por la resistencia. La resta de los torques es igual a cero. T = 0
- Una fuerza que actúe en el origen o eje de un sistema no tendrá efecto de torque pues no causará rotación del sistema.

- Solamente cuando la línea de acción de una fuerza es perpendicular a la palanca, la distancia entre la línea de acción de la fuerza y el eje de movimiento es igual al largo de la palanca.
- La dirección de los torques es positiva (+) si crea la tendencia de mover la palanca en dirección de las manecillas del reloj y, es negativa (-) si tiende a mover la palanca en dirección opuesta.
- El torque que produce un músculo varía según la posición en que se encuentre la articulación que mueve ese músculo. Ejemplo: El brazo del esfuerzo de los flexores del codo es mayor cuando el codo esta flexionado a 90° (la distancia perpendicular a la línea de acción del músculo y el eje de movimiento), por lo tanto el torque que producen estos músculos también será mayor en esa posición.
- La ecuación de equilibrio (T = 0) permite encontrar la magnitud de fuerzas que produce un músculo o fuerzas que se producen en la articulación que no se pueden medir directamente.

IV.II.e-Poleas

Se utilizan para cambiar la dirección de una fuerza ó para aumentar ó disminuir la magnitud de la fuerza.

Aplicación en el cuerpo humano: En el cuerpo no tenemos poleas como tal pero tenemos unas prominencias óseas y otros medios que permiten:

- Desviar la dirección de la fuerza de un músculo.
- Aumentar la ventaja mecánica del músculo al aumentar su brazo de esfuerzo (distancia perpendicular desde la línea de acción del músculo y el eje de movimiento de la articulación).

Existen dos tipos de poleas

Polea sencilla: Su propósito es cambiar la línea de una fuerza.

Poleas movibles: Este sistema de poleas distribuye el peso que se está levantando a través de un número de cuerdas, por lo tanto proveen ventaja mecánica.

IV.II.f-Centro de gravedad

El peso de un cuerpo se define como la fuerza de atracción gravitatoria ejercida por la tierra sobre él. La dirección de la *fuerza gravitatoria* sobre cada elemento de un cuerpo está dirigida verticalmente hacia abajo, al igual que la dirección de la resultante, independientemente de la orientación del cuerpo.[33]

El punto fijo por el cuál pasan todas estas líneas de acción recibe el nombre de centro de gravedad corporal (baricentro). En el ser humano está localizado por delante de S2. El baricentro está localizado en la intersección de los 3 planos corporales

Los cambios de posiciones del cuerpo causan cambios en la posición del centro de gravedad. Cualquier cambio en la posición de un segmento individual causará un cambio en la posición del centro de gravedad del segmento y del cuerpo también. Si flexionamos una extremidad movemos su centro de gravedad proximalmente. En este caso acortamos entonces el brazo de la resistencia en esa palanca de tercera clase. Esto resulta en una disminución del torque producido por esa resistencia. Esto facilitaría la actividad porque el torque que tiene que producir el esfuerzo debe ser igual al torque producido por la resistencia. Cuando aplicamos una pesa o resistencia en un segmento, el torque producido por esa resistencia será mayor cuando el segmento se encuentra horizontal. En esa posición la distancia entre la resistencia y el eje de movimiento es mayor [34].

IV.II.g- Estabilidad

Para que exista estabilidad, el centro de gravedad de un cuerpo debe proyectarse dentro de la base de soporte. El grado de estabilidad o movilidad de un cuerpo en términos mecánicos va a depender de:

- El tamaño de la base de soporte.
- La altura del centro de gravedad sobre la base de soporte.
- La localización de la línea de gravedad dentro de la base de soporte.
- El peso del cuerpo.

*Equilibrio Estable:*Alteramos la posición del centro de gravedad levemente y el cuerpo puede hacer los ajustes necesarios para lograr que el centro de gravedad regrese a su posición original.

Equilibrio no Estable: Alteramos la posición del centro de gravedad y el cuerpo no puede regresar a su posición original y asume una posición nueva.

Equilibrio Neutral: Cuando el centro de gravedad se desplaza pero permanece a un mismo nivel (el cuerpo ni se cae, ni regresa a la posición original, sino que se desplaza el centro de gravedad con su base de soporte).

Lo expuesto hasta aquí demuestra la interrelación armónica existente entre los aspectos físicos que se involucran en los procesos biomecánicos y, podemos concluir que el desarrollo de la biomecánica, como ciencia auxiliar, está signada por su progresiva aplicación en tres ámbitos de la vida del ser humano:

El médico, analizando las patologías que aquejan al cuerpo humano para generar soluciones capaces de evaluarlas, repararlas o paliarlas.

El deportivo, estudiando la práctica deportiva para mejorar su rendimiento, desarrollar técnicas de entrenamiento y diseñar complementos, materiales y equipamientos de altas prestaciones.

El ocupacional, analizando la reacción mecánica que el cuerpo humano sostiene con los elementos con que interactúa en distintos ambientes (laboral, docente, domestico, el de la automoción y el del ocio) para adaptarlos a sus necesidades y capacidades.

CAPÍTULO II

Física de los fluidos en medicina.

I- Conceptos físicos fundamentales de la mecánica de los fluidos.

La materia puede clasificarse, desde el punto de vista macroscópico, en cuatro estados de agregación, sólidos, líquidos y gases. Mientras que los sólidos tienen forma propia, los líquidos y los gases adoptan la forma del recipiente que los contiene.

Si consideramos una fuerza actuando sobre la superficie de un sólido, la dirección en la que actúa la fuerza no importa para la forma del sólido, ya que ésta no cambia; la acción de la fuerza se traduce en movimiento del cuerpo, desplazándose éste como un todo. Si la fuerza se aplica a un líquido o a un gas, el comportamiento del sistema es diferente: éstos tienden a fluir, es decir, a deslizarse por capas. Si consideramos un líquido contenido en un recipiente al actuar una fuerza sobre él, la componente perpendicular a la superficie del recipiente no contribuye al movimiento del líquido, pero la componente paralela a la superficie de dicho recipiente provocaría que las diversas capas del líquido se deslicen unas sobre otras, haciendo que éste pierda su estado de reposo. La propiedad de deslizamiento por capas ante la presencia de cualquier fuerza paralela a la superficie, sin importar su magnitud, se conoce como *fluir* e identifica tanto a los líquidos como a los gases; es por ello que se les conoce como *fluidos.*

Dicha propiedad es la responsable de que los fluidos cambien su forma. Para entender su comportamiento, es necesario desarrollar algunos conceptos previos, de modo que empezaremos por decir que para que un fluido esté en reposo, la fuerza que ejerce sobre

las paredes del contenedor que lo limita siempre es perpendicular a la superficie del contenedor, de otra forma existiría un flujo, es decir, el fluido estaría fuera de equilibrio. [35]

I.1-Presión

Debido a que gases y líquidos fluyen y adquieren la forma del contenedor, existe contacto entre el fluido y la superficie completa del recipiente. La fuerza ejercida por el fluido sobre el contenedor está distribuida sobre toda la superficie de contacto, y la forma más conveniente para describir esta situación es en términos de la fuerza normal a la superficie, por unidad de área, esto se conoce como *presión* y se simboliza por:

$$P = \frac{F}{A}$$

(Presión = fuerza / área).

La presión es una cantidad escalar, es decir, no tiene dirección, sólo magnitud, y se mide en Pa (Pascal), 1 Pa = 1 N/m^2, en mm de Hg, en atmósferas (atm), 1 atm = 760 mm de Hg, o en las unidades que se requieran dependiendo del sistema que se esté utilizando. Una atmósfera (1 atm) es la presión que sentimos debido a la existencia de la atmósfera terrestre al nivel del mar, es decir, es el peso de la atmósfera que rodea la Tierra por m^2 de superficie, lo que equivale a 1.013×10^5 N/m^2.

Es curioso saber que soportamos tanto peso y nuestro organismo funciona tan bien. Si consideramos además el caso de un buzo, a medida que desciende del nivel del mar, el peso sobre su cuerpo aumenta por la cantidad de agua que queda sobre él; esto implica que la presión sobre el buzo crece a medida que desciende. La pregunta que surge es: ¿por qué no muere aplastado?. La respuesta está en que para poder mantener su forma, el cuerpo ejerce una presión similar sobre el agua que lo rodea, de modo que la suma de las

dos presiones se anula, impidiendo que el buzo muera. En esto el sistema respiratorio y el circulatorio desempeñan un papel muy importante. Una presión ejercida sobre un fluido desde el exterior, es transmitida uniformemente a través de todo el volumen del fluido; de otra forma, éste podría fluir de una región de alta presión a una de baja presión igualándose las presiones; de este modo, el fluido que se encuentra en el fondo del contenedor está siempre a mayor presión que el de la superficie, debido al peso del propio fluido. Esto lo podemos aplicar también al cuerpo humano, ya que si en un momento dado medimos la presión de diferentes partes del cuerpo en una persona que se encuentra de pie, dicha presión será mayor en los pies que en la cabeza.

I.2- Ley de Pascal

El postulado anterior también puede expresarse como: cualquier presión aplicada a un fluido contenido en un recipiente se transmite íntegramente a toda porción de dicho fluido y a las paredes del recipiente que lo contiene, siempre que se puedan despreciar las diferencias de presión debidas al peso del fluido.

Esto en física se conoce como principio de **Pascal* y tiene muchas aplicaciones. Quizá la más conocida en medicina es la jeringa: la presión que se aplica en el pistón se trasmite íntegramente al fluido haciendo que salga a través de un área mucho menor, por lo que sale con gran velocidad. Si el área de salida es igual al área de aplicación de la fuerza, el fluido escaparía con la misma velocidad con la que se empuja; si el área de salida fuera mayor, la velocidad con la que saldría el fluido sería menor que la de empuje.

**Blaise Pascal (1623-1662), filósofo, matemático y físico francés, considerado una de las mentes privilegiadas de la historia intelectual de Occidente. En 1642 inventó la primera máquina de calcular mecánica. Pascal demostró mediante un experimento en 1648 que el nivel de la columna de mercurio de un barómetro lo determina el aumento o disminución de la presión atmosférica circundante.*

Otro hecho importante es que la presión sobre una superficie pequeña en un fluido es la misma, sin importar la orientación de dicha superficie. Dicho en otras palabras: la presión en un área pequeña dentro de un fluido depende únicamente de la profundidad a la que se encuentre dicha área; si no fuera así, la sustancia fluiría de tal forma que se igualaran las presiones. La fuerza ejercida por la presión en un fluido es la misma en todas direcciones a cualquier profundidad, y su magnitud depende de la profundidad, de la siguiente manera: [36]

$$P = \frac{F}{A} = \rho \cdot g \cdot h$$

donde ***ρ*** es la densidad del fluido. La densidad de un objeto es la razón de su masa con su volumen. Podemos escribir que:

ρ = masa/volumen $\frac{m}{v}$. Para los diferentes elementos, la densidad es una medida que los caracteriza.

En el sistema MKSC sus unidades son kg/m^3 y se miden con respecto al agua, cuya densidad es de 1 g/cm^3. Para medir la densidad de un fluido, como la sangre, basta con conocer el peso (que dividido entre el valor de la constante gravitacional $g = 9.81$ m/s^2 nos da el valor de la masa) y el volumen de una muestra, lo cual es fácilmente obtenible en el laboratorio con ayuda de una balanza y de una probeta.

Si se trata de un sólido, el problema se complica en caso de que no tenga una forma regular para poder calcular el volumen, pero experimentalmente puede medirse introduciendo el sólido en una probeta con agua (por ejemplo) y midiendo el volumen de agua desplazado, que será igual al del sólido.

I.3- Principio de Arquímedes

Si el cuerpo es muy grande, podemos aplicar el Principio de **Arquímedes*, que nos dice que el peso del fluido desplazado es igual a la diferencia entre el peso del cuerpo en el aire $\mathbf{W_a}$ y el peso del cuerpo en el fluido $\mathbf{W_f}$ [37].

$$\rho \cdot g \cdot V = W_{\alpha} - W_f$$

En un líquido las fuerzas de atracción entre las moléculas, aunque no son tan grandes como en los sólidos, sí son lo suficientemente fuertes para mantener a la sustancia en un estado condensado, de modo que podemos hablar de una superficie del líquido, de la cual puede medirse el área. Si deseamos incrementar el área superficial de una cantidad de líquido, es necesario llevar a cabo un trabajo sobre la superficie, es decir, se debe hacer un trabajo sobre las fuerzas de cohesión que son las que mantienen cercanas las moléculas de la superficie. El trabajo **W** requerido por unidad de área para incrementar el área de un líquido es llamado *tensión superficial* del líquido **σ.**

$$\sigma = \frac{W}{A}$$

sus unidades son J/m^2 (J son Joules, unidad de trabajo o energía) o bien en N/m.

Con el objeto de aclarar este concepto, considérese agua jabonosa; en un momento dado tendrá un área superficial determinada; si queremos aumentarla bastará con agitar el agua y producir espuma sobre la superficie; agitarla implica hacer trabajo sobre ella. De esta manera hemos aumentado su superficie.

**Arquímedes (287-212 a.C.), notable matemático e inventor griego, que escribió importantes obras sobre geometría plana y del espacio, aritmética y mecánica.*

Se usa la palabra tensión para describir el trabajo por unidad de área. Por el efecto que tiene que aplicar una tensión, es decir una fuerza a lo largo de uno de los lados de la superficie para estirarla se logra aumentar el área. Esto es fácil de imaginar si se piensa en un gancho en forma de U que ha sido sumergido a una solución jabonosa, y en el cual se cierra la U por medio de un alambre que puede desplazarse bajo la aplicación de una fuerza, tensando así la superficie.

I.4- Capilaridad

Otro fenómeno importante en el estudio de los fluidos es el de *capilaridad,* que es la habilidad que tiene un fluido de subir dentro de un tubo de diámetro interior pequeño, violando aparentemente la ley de gravedad. Considérese que un tubo de vidrio con un diámetro interior pequeño se introduce en agua: el agua subirá a una cierta altura en el tubo y presentará una forma cóncava; el líquido en contacto con las paredes del tubo estará a mayor altura que el líquido del centro del tubo. El agua realmente trepa por el tubo hasta que el empuje dado por la tensión superficial se equilibre con el peso de la columna de agua. La altura a la cual sube el líquido dentro de un tubo, depende de las magnitudes relativas de las fuerzas de cohesión y de las fuerzas de adhesión (fuerzas existentes entre las moléculas del líquido y las moléculas del tubo). Si las fuerzas de adhesión son grandes, se dice que el líquido moja al tubo y entonces trepa por él; si las fuerzas de cohesión son mayores que las de adhesión, entonces el líquido no moja al tubo y no sube por su interior; esto último ocurre en el caso del mercurio [38].

Este efecto es muy importante en biología ya que el agua sube por capilaridad, desde las raíces de un árbol hasta las hojas más altas de su follaje; también por capilaridad se lleva a cabo la irrigación de parte del organismo de los animales de sangre caliente; en el cuerpo humano se llevan a cabo multitud de fenómenos por capilaridad, sobre todo a nivel celular.

Hasta ahora sólo han sido consideradas situaciones estáticas para los fluidos, pero el comportamiento de ellos cambia ante situaciones dinámicas.

I.5- Bernoulli

El comportamiento de muchos de los fluidos en movimiento está muy cercanamente descrito por la ecuación de **Bernoulli* , la cual establece que la cantidad dada por:

$$P + \rho \cdot g \cdot h + \left(\frac{1}{2}\right) 2\rho \cdot v^2$$

donde **P** es la presión a la que se encuentra el fluido, ***ρ*** es su densidad, **g** es la constante de gravedad y **v** es la velocidad del fluido que se mantiene constante en cualquier punto de la trayectoria del fluido, el cual debe cumplir con ciertas características para que la ecuación dada arriba sea válida; no debe haber viscosidad o ésta debe ser muy pequeña, y debe fluir en forma perfectamente lisa, es decir, que el flujo debe ser laminar; no debe haber turbulencias (Figura 1); si se trata de un gas, no debe haber compresión apreciable, es decir, entre dos puntos arbitrarios de la trayectoria del gas, la diferencia en las presiones debe ser pequeña.

**Daniel Bernoulli (1700-1782), Perteneció a una extensa familia de matemáticos de Suiza y demostró que cuando la velocidad de un fluido aumenta, la presión disminuye. Sus trabajos fueron fundamentales es el análisis de las cuerdas vibrantes, las mareas y la teoría cinética de los gases.*

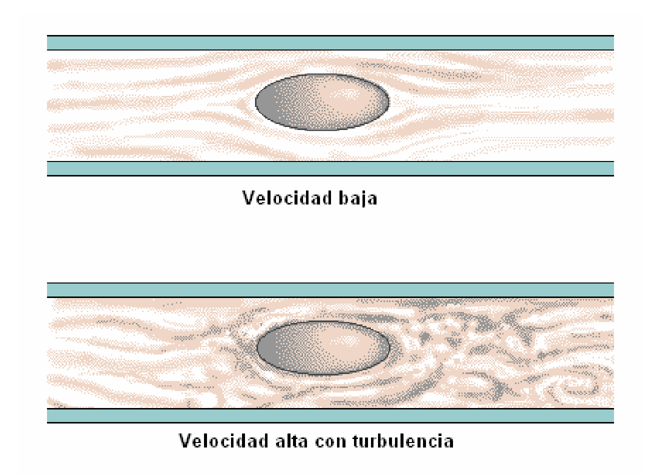


Figura 1. Movimiento laminar y turbulento

A bajas velocidades, los fluidos fluyen con un movimiento suave llamado laminar. A velocidades altas, el movimiento de los fluidos se complica y se hace turbulento. En los fluidos que fluyen por tubos, la transición del movimiento laminar al turbulento depende del diámetro del tubo y de la velocidad, densidad y viscosidad del fluido.

Cuanto mayores son el diámetro, la velocidad y la densidad, y cuanto menor es la viscosidad, más probable es que el flujo sea turbulento. Escrita de otra forma, la ecuación de Bernoulli queda como:

$$P + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

Esta ecuación se aplica a muchas situaciones en medicina, como son la medida de la presión arterial, la aplicación de presión de aire en los pulmones para respiración artificial, el drenado de fluidos corporales a través de sondas, etcétera.

I.6-Campo de esfuerzos

Los esfuerzos en un continuo son el resultado de fuerzas que actúan en alguna parte del medio. El concepto de esfuerzo constituye una forma apropiada para describir la manera en que las fuerzas que actúan sobre las fronteras del medio se transmiten a través de él. Puesto que tanto la fuerza como el área son cantidades vectoriales, podemos prever que un

campo de esfuerzos no resulta un campo vectorial: veremos que, en general, se necesitan nueve cantidades para especificar el estado de esfuerzos en un fluido. (El esfuerzo es una cantidad tensorial de segundo orden) [39].

I.7-Fuerzas superficiales y fuerzas volumétricas

En el estudio de la mecánica de los fluidos continuos suelen considerarse dos tipos de fuerzas: las superficiales y las volumétricas. Las fuerzas superficiales son aquellas que actúan sobre las fronteras del medio a través del contacto directo. Las fuerzas que actúan sin contacto físico, y que se distribuyen sobre el volumen del fluido, se denominan fuerzas volumétricas. Ejemplos de éstas, que actúan sobre un fluido, son las fuerzas gravitacionales y las electromagnéticas.

La fuerza gravitacional que actúa sobre un elemento de volumen, **dV,** está dada por

$$\boldsymbol{\rho} .\ g.\ dV$$

donde $\boldsymbol{\rho}$ es la densidad (masa por unidad de volumen) y **g** es la aceleración local de la gravedad. Así, la fuerza volumétrica gravitacional por unidad de volumen es **ρ.g** y la fuerza volumétrica gravitacional por unidad de masa es **g**.

I.8-Fluido newtoniano

Hemos definido un fluido como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. En ausencia de éste, no existe deformación. Los fluidos se pueden clasificar en forma general, según la relación que existe entre el esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante*. Aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación se denominan fluidos newtonianos.*

La mayor parte de los fluidos comunes como el agua, el aire, y la gasolina son prácticamente newtonianos bajo condiciones normales.

El término *no newtoniano* se utiliza para clasificar todos los fluidos donde el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la rapidez de deformación [40].

Viscosidad: Si se considera la deformación de dos fluidos newtonianos diferentes, por ejemplo, glicerina y agua, se encontrará que se deforman con diferente rapidez para una misma fuerza cortante. La glicerina ofrece mucha mayor resistencia a la deformación que el agua; se dice entonces que es mucho más viscosa. En la mecánica de fluidos se emplea muy frecuentemente el cociente de la viscosidad absoluta,μ, entre la densidad, ρ. Este cociente recibe el nombre de viscosidad cinemática y se representa mediante el símbolo $\boldsymbol{v}$.

La viscosidad es una manifestación del movimiento molecular dentro del fluido. Las moléculas de regiones con alta velocidad global chocan con las moléculas que se mueven con una velocidad global menor, y viceversa.

Estos choques permiten transportar cantidad de movimiento de una región de fluido a otra. Ya que los movimientos moleculares aleatorios se ven afectados por la temperatura del medio, la viscosidad resulta ser una función de la temperatura

II- Física del sistema cardiovascular.

La hemodinámica arterial, o sea el estudio de la circulación sistémica, abarca dominios muy diversos. Su campo de investigación podría resumirse como la descripción y comprensión de los fenómenos fisiológicos y fisiopatológicos en relación a la onda de presión y al flujo de sangre en las arterias.

El conocimiento de la física (propiedades hidrodinámicas y mecánicas) del sistema cardiovascular, y su relación con datos fisiológicos y patológicos ha sido el objetivo de varios

científicos desde tiempos muy remotos. *Aristóteles* (384-322 a.C.) fue un elocuente defensor de la relación entre la Física (que el entendía como la descripción general del Universo) y el estudio de las cosas vivientes. En 1615 *William Harvey* (1578-1658) describió la circulación en un descubrimiento que podría ser catalogado como teórico debido a que llegó a tamizar sus convicciones a través de razonamientos lógicos. La existencia de capilares se hizo efectiva por *Marcello Malpigie* (1628-1694) 45 años después que Harvey los describió como una necesidad lógica. Un contemporáneo de Harvey fue *Galileo Galilei* (1564-1642) que fue estudiante de medicina antes de trascender como un físico famoso.

El descubrió la constancia del periodo del péndulo y la utilizó para medir frecuencia cardiaca. Se deben mencionar otros nombres por demás conocidos en los ámbitos de la ingeniería y la fisiología, como por ejemplo *Adolf Fick* (1829-1901) autor de la ley que rige la transferencia de masa, mientras que *Diederik Johanes Korteweg* (1848-1941) y *Horace Lamb* (1849-1941) escribieron excelentes trabajos sobre la propagación de ondas en arterias. *Otto Frank* (1865-1944) trabajó sobre hidrodinámica cardiaca y *Van der Pol* (1929) modelizó el corazón con osciladores no-lineales para producir electrocardiogramas con semejanza a la realidad. Para completar esta amalgama entre la física y la biología sería interesante recordar a Thomas Young que, cuando intentaba conocer la formación de la voz humana justificaba su licenciatura en física, diciendo que sin ella jamás hubiera podido escribir su disertación médica ni entender los temas referidos a ella.

La aplicación de la mecánica al estudio de los grandes troncos arteriales, es consecuencia de razones técnicas y de necesidades fisiológicas. Con el advenimiento de los más modernos métodos de medición se ha logrado conocer las variaciones de flujo, presión y deformación de las arterias de mediano y grueso calibre sobre todo del tipo de las arterias humeral, femoral y carótida. Para asociar este progreso a la fisiología se debe recordar que

la macrocirculación (o sea el territorio arterial de grueso y mediano diámetro) está dominada por el efecto amortiguador de la función capacitiva de estas arterias y la microcirculación por el efecto disipativo debido a la predominancia resistiva del lecho arteriolar. Es decir que todo fenómeno dinámico como la propagación de la pulsatilidad y los fenómenos de ella derivados deberían ser analizados en grandes arterias donde se concentra más del 70% de la capacitancia del árbol arterial.

En concordancia con ello, existe evidencia experimental que estos vasos de capacitancia, es decir aorta y grandes arterias, podrían además tener un rol primario en la génesis de la hipertensión arterial y por lo tanto en los trastornos que la misma determina. Para cerrar este anillo de fundamentos sobre el análisis de las propiedades mecánicas de la pared aórtica debe establecerse que las modernas teorías que tratan la transferencia óptima de energía entre la bomba cardiaca y la carga arterial toman en consideración principalmente las características viscoelásticas de la pared aórtica junto a las propiedades contráctiles del ventrículo izquierdo.

La Biomecánica permite un estudio del sistema circulatorio desde dos diferentes aspectos, la *mecánica de medios continuos y la mecánica de los fluidos*. Es decir que un análisis racional incluye por un lado el estudio de la pared arterial y por otro el de la sangre que esté contenida en su interior. Con la ayuda de la mecánica de los medios continuos, la pared arterial, material heterogéneo y **anisotrópico* por excelencia, se estudia como un material compuesto por fluido y tejido en el que se consideran tres características principales: elasticidad, viscosidad e inercia.

**Cualidad de un medio, generalmente cristalino, en el que alguna propiedad física depende de la dirección de un agente.*

La pared arterial puede sufrir alteraciones generadas en forma pasiva, que son extrínsecas, como lo son el aumento o la disminución de la presión arterial, lo que produce modificación en sus dimensiones, y por otro lado puede sufrir alteraciones intrínsecas, habitualmente mediadas por estímulos nerviosos y humorales, o provocadas farmacológicamente por un sinnúmero de elementos químicos. Si bien este material está regido por las mismas leyes de la conservación de la masa, del momento de fuerzas, del balance energético y la entropía como cualquier otro material, lo que lo distingue de otro material común de uso en la ingeniería es la ecuación constitutiva. Es ésta una de las causas más comunes de fracaso entre los mecánicos analíticos: la falta de información para la construcción de las relaciones *tensión-deformación* de los tejidos vivientes. Por tal motivo el informe de situación es complejo: los materiales biológicos son sistemas multifase, no homogéneos y anisotrópicos; los fluidos son no Newtonianos, los sólidos son no **Hookoneanos*, y están sujetos a una deformación finita en condiciones de vida normal. Las dificultades de trabajos con estos materiales son obvias [41].

El sistema cardiovascular está formado por el corazón, la sangre y los vasos sanguíneos y, cada uno desarrolla una función vital en el cuerpo humano. Aquí hablaremos sólo de una parte de la física que se involucra en su funcionamiento. La función principal del sistema circulatorio es transportar materiales en el cuerpo; la *sangre* recoge el oxígeno en los pulmones y, en el intestino recoge nutrientes, agua, minerales, vitaminas y los transporta a todas las células del cuerpo. Los productos de desecho, como el bióxido de carbono, son recogidos por la sangre y llevados a diferentes órganos, como pulmones, riñones, intestinos, etc, para ser eliminados. Casi el 7% de la masa del cuerpo se debe a la sangre.

**Robert Hooke (1635-1703), científico inglés, conocido por su estudio de la elasticidad*

Entre sus componentes hay células muy especializadas: los *leucocitos* o células blancas están encargadas de atacar bacterias, virus y en general a todo cuerpo extraño que pueda dañar nuestro organismo; las *plaquetas* son las encargadas de acelerar el proceso de coagulación, defensa del cuerpo cuando se encuentra una parte expuesta; los *eritrocitos* o células rojas llevan el oxígeno y el alimento a todas las células del cuerpo. El sistema cardiovascular humano (y en general mamífero) es un circuito muy simple. Consta de dos bombas fusionadas en un solo corazón (inicialmente fue una sola bomba que evolutivamente se dividió en dos), que impulsan la sangre por un circuito cerrado, de esta manera el ventrículo izquierdo del corazón bombea la sangre oxigenada por la contracción de sus músculos a una presión de casi 125 mm de Hg por la arteria aorta y se reparte a todos los órganos y tejidos del cuerpo a través del sistema arterial. En los lechos capilares la sangre hace su trabajo de intercambio de nutrientes y desechos y regresa por el sistema venoso, o *sistema de retorno venoso* [42]. Después de pasar por toda la malla de vasos capilares, la sangre se colecta en pequeñas venas (vénulas) que gradualmente se combinan en *venas* cada vez más gruesas hasta entrar al corazón por dos vías principales, la vena cava superior y la vena cava inferior. La sangre que llega al corazón pasa primeramente a un reservorio conocido como aurícula derecha donde se almacena; una vez que se llena se lleva a cabo una contracción leve (de 5 a 6 mm de Hg) y la sangre pasa al ventrículo derecho a través de la válvula tricúspide que se ilustra en la figura 2

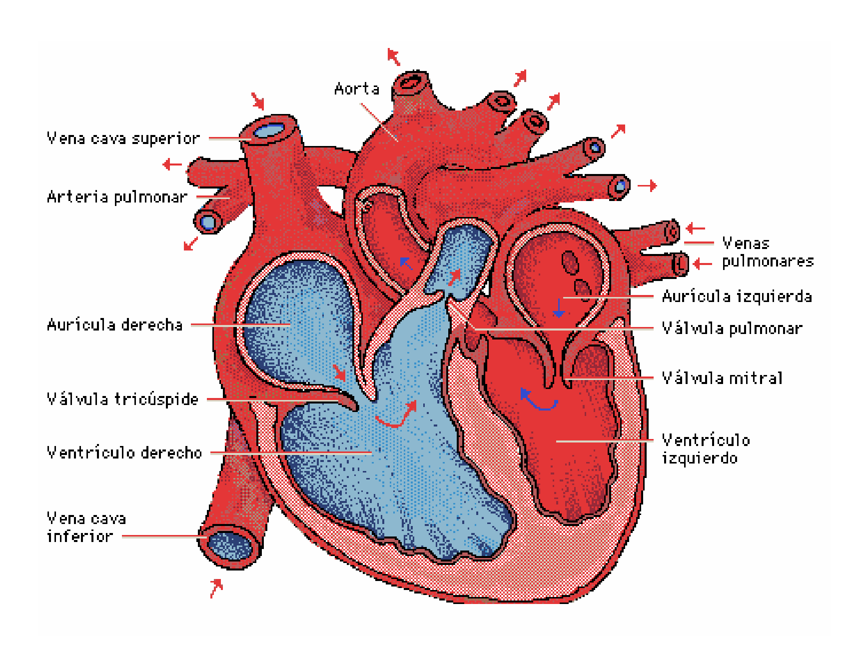


Figura-2 Partes principales del corazón

Dependiendo del camino tomado, una vuelta completa puede tardar entre 10 y 60 segundos. En la siguiente contracción ventricular, la sangre se bombea a una presión de 25 mm de Hg pasando por la válvula pulmonar a las arterias pulmonares y hacia los vasos capilares de los pulmones, ahí recibe O_2 y se desprende del CO_2 que pasa al aire de los pulmones para ser exhalado. La sangre recién oxigenada regresa al corazón por las venas de los pulmones, llegando ahora al reservorio izquierdo o aurícula izquierda. Después de una leve contracción de la aurícula (7 a 8 mm de Hg) la sangre llega al ventrículo izquierdo pasando por la válvula mitral. En la siguiente contracción ventricular, la sangre se bombea hacia el resto del cuerpo, y sale por la válvula aórtica. En un adulto el corazón bombea cerca de 80 ml por cada contracción. Es evidente que las válvulas del corazón deben funcionar en forma rítmica y sincronizada, ya que de no ser así el cuerpo puede sufrir un paro cardiaco. Actualmente, las válvulas pueden sustituirse si su trabajo es deficiente. De lo anterior, es obvio que el corazón realiza un trabajo. Las presiones de las dos bombas del corazón no son iguales: la presión máxima del ventrículo derecho llamada *sístole* es del orden de 25 mm de Hg, los vasos sanguíneos de los pulmones presentan poca resistencia al paso de la sangre. La

presión que genera el ventrículo izquierdo es del orden de 120 mm de Hg, mucho mayor que la anterior, ya que la sangre debe viajar a todo el cuerpo. Durante la fase de recuperación del ciclo cardiaco o *diástole*, la presión típica es del orden de 80 mm de Hg [43].

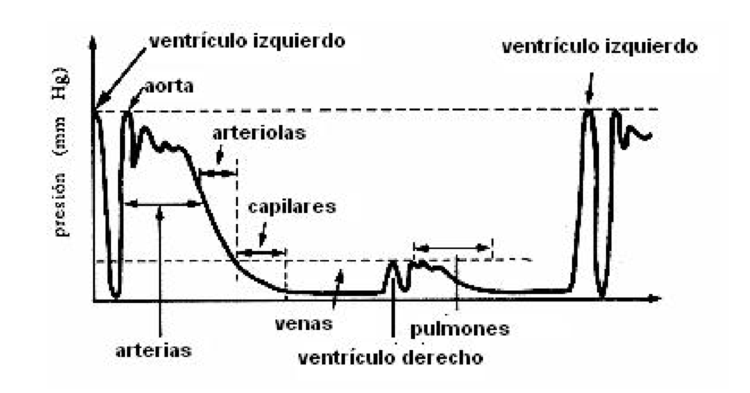


Figura 3. Gráfica que muestra cómo varía la presión en el sistema circulatorio. Nótese que la presión venosa es muy pequeña.

Como se indica en la figura 3, la caída de presión más alta en el sistema cardiovascular ocurre en la región de las arteriolas y capilares. Los capilares tienen paredes muy delgadas $(\sim 1\mu m)$ que permiten la difusión del oxígeno y del dióxido de carbono de manera fácil. Para entender por qué no revientan, debemos ver cómo se relaciona la presión dentro del tubo **P**, con el radio del tubo **R** y la tensión que siente debido al fluido **T** en sus paredes.

La presión es la misma en las paredes, de modo que la fuerza por unidad de longitud que empuja hacia afuera es **R.P**. Por otro lado, existe una fuerza de tensión **T** por unidad de longitud que mantiene unido al tubo. Debido a que el sistema (pared-fluido) está en equilibrio se debe cumplir: **T = R.P** así si el radio del tubo es muy pequeño, la tensión también lo es.

Un método para medir la presión arterial sistólica y diastólica es usar el esfigmomanómetro, que consiste en un brazalete inflable de aproximadamente 13 cm. de ancho, que se coloca alrededor del brazo, conectado a un manómetro (medidor de presión) de mercurio, tubo que

tiene un depósito de mercurio en su parte inferior y está graduado en milímetros. La presión de aire en el brazalete se eleva hasta sobrepasar la presión sistólica, logrando así colapsar la arteria humeral e impidiendo el flujo de sangre por ella. Si se deja salir lentamente el aire del dispositivo, cuando la presión sobre la arteria alcance el valor de la presión sistólica la sangre comenzará a fluir a través de la arteria, lo cual se puede detectar por medio del sonido que produce. La sangre fluirá en forma intermitente hasta alcanzar la presión diastólica, lo cual se detecta porque el sonido desaparece.

La sangre tiene una densidad de 1.04 g/cm³, muy cercana a la del agua que es de 1.00 g/cm³, por lo que podemos hablar del sistema circulatorio como un sistema hidráulico donde las venas y las arterias son similares a mangueras. Como sucede con cualquier circuito hidráulico, la presión en el sistema circulatorio varía a través del cuerpo, la acción de la gravedad es muy notoria en las arterias donde la presión varía de un punto a otro.

Sabemos de la física, que los líquidos en reposo trasmiten íntegramente y en todas direcciones las presiones que se les aplican, lo que no sucede así cuando éstos se hallan en movimiento a través de un tubo. Este último es el caso cuando consideramos el sistema circulatorio: el fluido es la sangre y las arterias y venas los tubos del circuito. Si el líquido fluye por un tubo recto en forma rítmica, el flujo es laminar, es decir que puede imaginarse como un conjunto de láminas concéntricas que se deslizan una sobre otra, la central será la de mayor velocidad mientras que la que está tocando al tubo tendrá la mínima velocidad. Si consideramos las velocidades de las diferentes capas de líquidos en un tubo tendremos que el fluido que está en contacto con la pared del tubo que lo contiene prácticamente no se mueve, las moléculas del fluido que se mueven a mayor velocidad son las que se encuentran en el centro del tubo. El sistema de tubos que conforman el sistema circulatorio del hombre, con la circulación general o sistémica y la circulación pulmonar está esquematizado en la figura 4. Estos dos circuitos están dispuestos en serie de modo que

una partícula que pase por la aorta obligatoriamente deberá pasar por la arteria pulmonar y el flujo de sangre y los mililitros por minuto que pasan por la aorta, serán los mismos que pasan por la arteria pulmonar. Por el contrario, los distintos órganos irrigados por la circulación general están dispuestos en paralelo con respecto la aorta y las venas cavas. Lo mismo ocurre en la circulación pulmonar con los pulmones y sus lóbulos con respecto a la arteria pulmonar y las venas pulmonares.

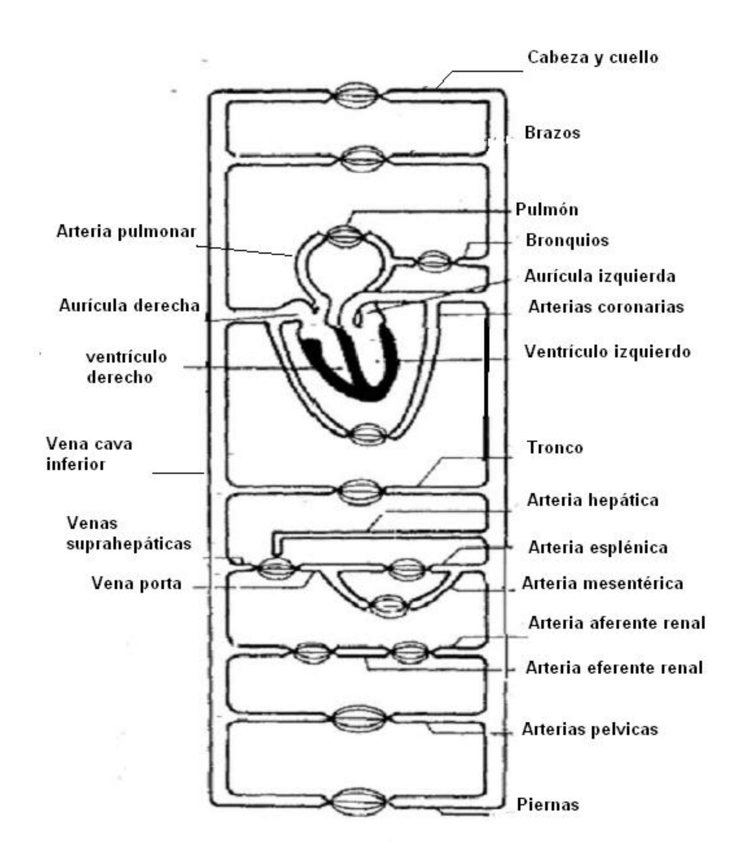


Figura 4- El sistema circulatorio en el hombre. La circulación sistémica y pulmonar se dispone en serie mientras que las de los órganos se disponen en paralelo. Los términos "serie" y "paralelo" vienen de los circuitos eléctricos y para identificarlos como paralelo basta ver si 2 o más resistencias (lechos vasculares) están sometidos a la misma diferencia de voltaje, presión). En serie hay una caída de presión entre el primer y segundo lecho vascular.

Una partícula que sale, por ejemplo, del ventrículo izquierdo tiene varios caminos para llegar a la aurícula derecha y los flujos por las distintas resistencias pueden ser distintos. Una característica importante del sistema arterial del hombre es la forma en que se va

bifurcando. Siempre que de un tronco se generen ramas, la suma del área de sección tranversal de las ramas será mayor que el área de sección del tronco original [44]. Mientras que la sección de una arteria es menor que la sección de la aorta, la sección total de las arterias, dada por la sumatoria de las áreas de sección de todas las arterias será mayor que el área de sección de la aorta.

Esto mismo ocurre con arteriolas y capilares y sigue un proceso inverso en venas. Esta disposición está resumida en la figura 5.

Nótese que el gran incremento ocurre en las arteriolas y capilares. Si el área de la aorta puede estimarse en 7 cm2, el área de todos los capilares es superior a los 4000 cm^2, aunque el radio de un capilar sea de 8 µm = 8.10-4 cm y su área de 2.10-6 cm^2.

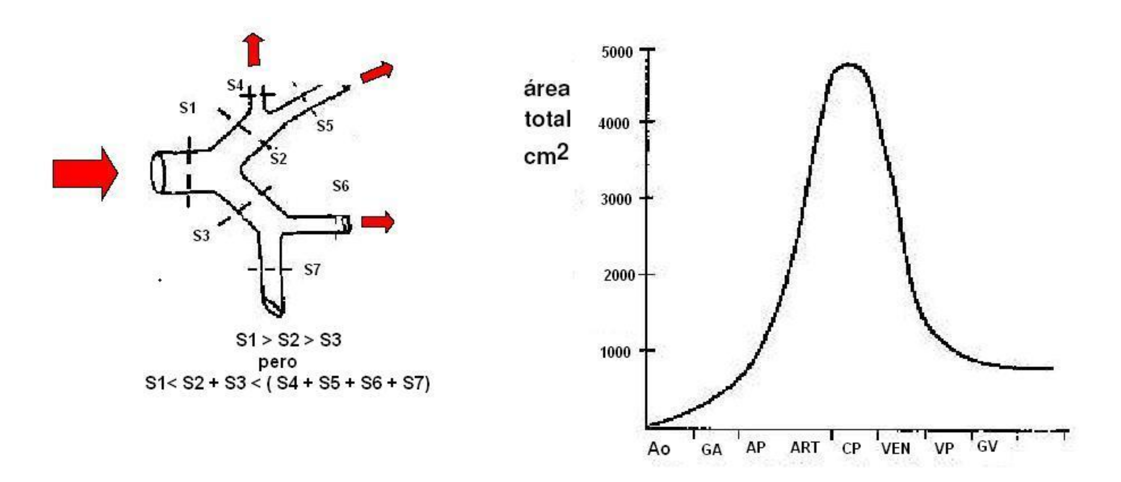


Figura 5-. Ramificaciones del sistema circulatorio. A la izquierda:: la sección de ***cada una de las ramas*** *es progresivamente menor, pero la* ***suma de las secciones*** *es progresivamente mayor. A la derecha: el área total de cada uno de los segmentos vasculares* ***(Ao: aorta; GA: grandes arterias; AP: arterias pequeñas: ART: arteriolas; CP: capilares; VEN: vénulas; VP: venas pequeñas: GV: grandes venas)***

Lo que se mueve por el sistema circulatorio del hombre es sangre, compuesta por agua y sustancias disueltas formado soluciones verdaderas (glucosa, urea, ácido úrico, bicarbonato, sodio, potasio, etc.), soluciones coloidales (proteínas plasmáticas) y suspensiones (eritrocitos). Todo ello forma un líquido que presenta viscosidad. Por ahora sólo es necesario

entender que la viscosidad es una propiedad del líquido que se opone a que éste fluya. Dicho de otra manera, porque la sangre tiene viscosidad, en el sistema circulatorio existe una resistencia al lujo de sangre. Y, siguiendo con este razonamiento, si pese a la resistencia, la sangre fluye de un modo constante, es porque existe una fuente de energía, una bomba, el corazón, que permite recuperar la energía que se pierde por efecto de la *viscosidad*. La energía necesaria para que el líquido viaje por el tubo debe vencer la fricción interna de una capa sobre otra.

Si el líquido tiene una viscosidad **h** el flujo sigue siendo laminar, siempre y cuando el valor de la velocidad del fluido **V** por el diámetro del tubo **d** dividido entre el valor **h** no exceda de un valor crítico conocido como número de **Reynolds*

$\left(Re = \frac{Vd}{\eta}\right)$ si **Re** es mayor que 2 100, la corriente laminar se rompe y se convierte en turbulenta, es decir, forma remolinos, chorros y vórtices.

** Osborne Reynolds (1842-1912) , ingeniero británico que demostró la existencia de dos tipos de flujo viscoso en tuberías. Reynolds también determinó que la transición del flujo laminar al turbulento era función de un único parámetro, que desde entonces se conoce como número de Reynolds. Si el número de Reynolds —que carece de dimensiones y es el producto de la velocidad, la densidad del fluido y el diámetro de la tubería dividido entre la viscosidad del fluido— es menor de 2100, el flujo a través de la tubería es siempre laminar; cuando los valores son más elevados suele ser turbulento. El concepto de número de Reynolds es esencial para gran parte de la moderna mecánica de fluidos.*

La energía requerida para mantener una corriente turbulenta es mucho mayor que la necesaria para mantener una corriente laminar. La presión lateral ejercida sobre el tubo aumenta. Aparecen vibraciones que pueden ser detectadas como sonido. En la circulación humana normal el flujo es laminar, rara vez es turbulento, con excepción de la aorta y bajo condiciones de ejercicio intenso. Los glóbulos rojos de la sangre en una arteria no están uniformemente distribuidos, hay más en el centro que en los lados, lo cual produce dos efectos: uno, cuando la sangre entra a un conducto pequeño a un lado del conducto principal, el porcentaje de glóbulos rojos que pasan será ligeramente menor que en la sangre que se encuentra en el conducto principal; el segundo efecto es más importante, debido a que el plasma sanguíneo se mueve más lentamente a lo largo de las paredes de los vasos que los glóbulos rojos, la sangre en las extremidades tiene un porcentaje mayor de glóbulos rojos que cuando deja el corazón, el cual es aproximadamente del orden de un 10%. [45]

El volumen de agua del intravascular se podía calcular como el 5 % del peso corporal y para un hombre de 70 kg, como unos 3,5 L de agua intravascular.

El volumen total ocupado por la sangre recibe el nombre de volemia y es el volumen de agua y el volumen ocupado por los sólidos del plasma y los sólidos de las células sanguíneas. La volemia es de unos 70 a 80 mL de sangre por kilogramo de peso corporal y, para el sujeto de 70 kg, unos 4900 a 5600 mililitros de sangre. Un valor fácil de recordar, y el que usaremos en lo adelante es el de 5000 mL (5 L) para un adulto sano.

Si pudiéramos detener bruscamente la circulación y medir el volumen de sangre en las distintas partes del cuerpo y en los distintos segmentos del árbol arterial, veríamos que estos 5 litros de sangre no están homogéneamente distribuidos. Hay más sangre por debajo del diafragma que por arriba de él y esta diferencia aumenta notablemente cuando el sujeto se

pone de pie. También hay más sangre en las venas, en especial en las de pequeño calibre, que en el sector arterial y muchísimo más que en los capilares. Esto nos da una idea de la capacidad y distensibilidad de las venas.

El corazón, actuando como una bomba mecánica, impulsa la sangre por la aorta. El volumen de sangre que pasa en un minuto por la aorta es un flujo o caudal **Q** y, como tal, se podría medir en cualquiera de las unidades siguientes:

$$Q = \frac{\textit{volumen}}{\textit{tiempo}} = \frac{V}{t}$$

L/s; cm^3/min; cm^3/s; mL/ min; L/ min; etc.

Sin embargo, lo habitual es hablar del *gasto cardiaco* en litros por minuto. Cuando se quiere realizar algunos cálculos hemodinámicos se usan las unidades mL/min o cm3/s.

5 L/min para el gasto cardíaco es también una cifra fácil de recordar, pero que sólo debe usarse como válida para un sujeto adulto en reposo ya que durante un ejercicio intenso puede aumentar hasta 5 veces su valor basal.

La aorta no es el único sitio donde se puede medir el gasto cardíaco. Si pasan 5 L/min por la aorta, ese será el caudal de la vena cava inferior y la vena cava superior sumados. Ese será también el caudal de la arteria pulmonar y el caudal de todas las venas pulmonares. Obviamente, si del ventrículo izquierdo salen 5 L/min, por todos los capilares pasan 5 L/min. Lo que sí no hay duda es que es más sencillo medir el flujo en la aorta que, al mismo tiempo, en todos los capilares y es por eso que, cuando se habla de gasto cardíaco se refiere, por lo genera!, a una medida hecha a la salida del ventrículo izquierdo. En la figura 6 se muestra que, en todas las ramas, la suma de los caudales es igual al caudal original

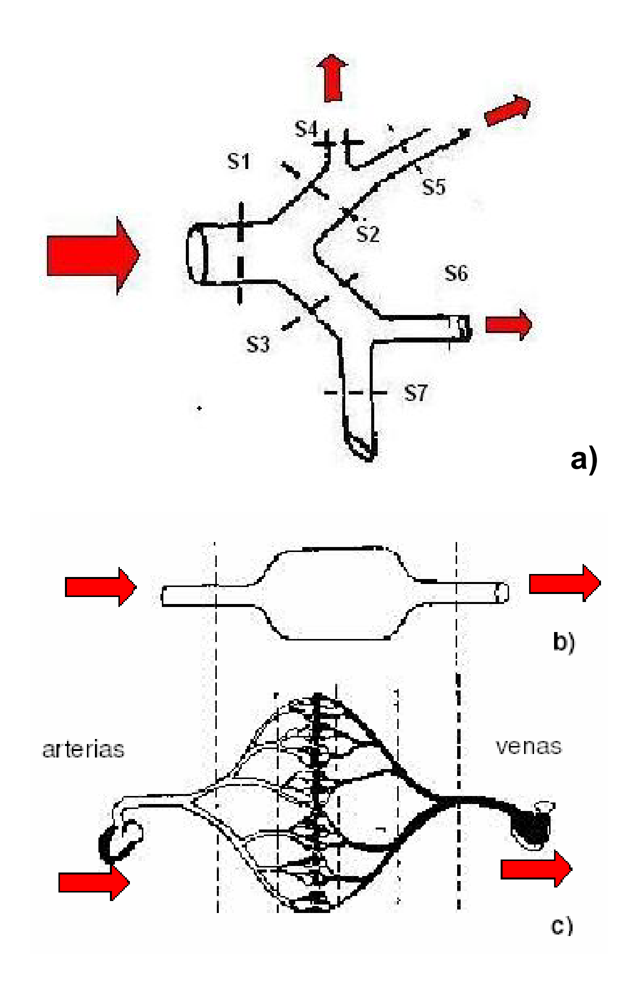


Figura 6- Tres maneras de entender las características del sistema circulatorio. a) El área transversal total de las ramas es mayor que el área del tronco principal. b) El flujo de entrada es igual al flujo de salida, pero pasa por una especie de "lago", muy ancho. c) las arterias se ramifican en arteriolas y capilares y el flujo de entrada es colectado por las vénulas y venas, para llegar a la aurícula y ventrículo derecho

El corazón es una bomba que expulsa la sangre siguiendo ciclos o latidos formados por la diástole, período durante el cual la sangre ingresa al corazón y la sístole en que es expulsada. Estos ciclos se repiten con una frecuencia **f** de unos 80 latidos por minuto en reposo hasta más de 180 por minuto durante el ejercicio. Si aceptamos un gasto cardíaco de 5 L/min y una frecuencia de 80 latidos/min tendremos que por cada sístole se expulsan 5000 mL/80 = 62,5 mL/latido se conoce como volumen latido o volumen sistólico **VS**. Sería lógico pensar que si se aumenta la frecuencia cardíaca aumenta simultáneamente el gasto cardíaco, ya que:

Q= f . VS

Sin embargo, se necesita un tiempo para llenar las cavidades cardíacas y al aumentar la frecuencia este tiempo disminuye, lo que provocaría una disminución de **VS**, y **Q** no aumentaría en forma lineal con la frecuencia y la relación anterior sólo es valida a VS constante.[46] Para un tubo rígido dado, de radio **r** y longitud **l**, el volumen del líquido de viscosidad **η** está relacionado con el gradiente de presión de un extremo a otro del tubo **(Pl - P2**), **8** es una constante**.** El matemático francés **Poiseuille* encontró que el gasto está relacionado con estos parámetros:

$$Q = \frac{\Delta P \,.\, \pi\, r^4}{8 \,.\, l \,.\, \eta}$$

Donde Δ**P** y **Q** son nuestros conocidos "diferencia de presión" y "caudal", mientras que **r** es el radio del tubo, **l** la longitud del tubo, **η** la viscosidad del líquido que circula por el tubo y **8** una constante.

**Jean Louis Marie Poiseuille (1799 - 1869) médico fisiólogo Francés que empleó un largo periodo de su vida por caracterizar el flujo de la sangre*

Nótese que esta ecuación se puede reescribir de este modo:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta P}{R} = \frac{\Delta P}{\dfrac{8 \cdot l \; \eta}{\pi \, r^4}} = \frac{\Delta P \text{. cuadrado de la sección}}{8 \text{. longitud . viscosidad}}$$

Esto quiere decir que, a presión constante, el caudal disminuye al aumentar la resistencia y que ésta es tanto mayor cuanto mayor sea la longitud del tubo y la viscosidad del líquido y menor sea el área de sección transversal del tubo.

El *coeficiente de viscosidad* de la sangre se suele expresar como un valor en relación a la viscosidad del agua. Para una sangre con un hematocrito del 45 % vale entre 2 y 4,5, de acuerdo con el método de medida que se use, lo que indica que la sangre ofrece de 2 a 4,5 veces más resistencia al flujo que el agua.

Vasodilatación y vasoconstricción en un sistema a presión constante: Si la diferencia de presión entre la arteria y la vena que irrigan un órgano se mantiene siempre en el mismo valor, de acuerdo a la ecuación de Poiseuille la vasodilatación lleva a un aumento del caudal y una vasoconstricción a una disminución.

Durante el ejercicio, por ejemplo, los requerimientos de O_2 por parte de los músculos aumentan, hay vasodilatación y aumento de flujo (hiperemia). En un ambiente frío, los vasos de la piel se contraen, el flujo de sangre disminuye y la pérdida de calor es menor.

Vasodilatación y vasoconstricción en un sistema a flujo constante: La ecuación de Poiseuille puede ser reescrita para una condición en la que el flujo sea constante. Así,

$$\Delta P = \frac{Q \cdot 8\, l \cdot \eta}{\pi\, r^4}$$

Esto quiere decir que, para un cierto valor de **r, l** y **η** debe existir un cierto valor de ΔP para que exista ese valor de **Q.** Frente a una disminución de **r**, debe existir un aumento de ΔP para que el caudal se mantenga constante. Esto, en el sistema circulatorio del hombre, es uno de los mecanismos propuestos para explicar la *hipertensión arterial* un aumento de la resistencia periférica haría disminuir el caudal en sitios claves, lo que determinaría una respuesta cardiaca, como el aumento de la presión arterial, que tendería a restituir el flujo sanguíneo.

Todos los puntos del sistema circulatorio, ya sea la aorta, los capilares o las venas, se encuentran a una presión que es, generalmente y con el sujeto acostado, mayor que la presión atmosférica, la que rodea a todo el cuerpo del sujeto. Se dirá, por ejemplo, que en una arteria hay 100 mm Hg y en una cierta vena hay 3 mm Hg, indicando que en la arteria hay 100 mm Hg más que en la atmósfera y en la vena 3 mm Hg más que en la atmósfera. Esta manera de señalar las presiones es absolutamente válida si se tiene en cuenta que la sangre circula, venciendo la resistencia que le ofrece la viscosidad de la sangre, siempre que entre 2 puntos del sistema circulatorio haya una diferencia de presión. No importa, entonces, el valor absoluto de la presión.

Un buzo a 40 m de profundidad está sometido a 5 atmósferas de presión (la atmosférica + 1 atmósfera por cada 10 m de profundidad) y su sangre seguirá circulando con una diferencia de presión igual a la de un hombre en la superficie.

En clínica es rutinario usar "milímetros de mercurio" para las presiones arteriales y "milímetros de agua" para presiones venosas por el tipo de manómetros que se usan para

medirlas. En la figura 7 se ha dibujado un manómetro sencillo. Es un tubo de vidrio doblado en U y con mercurio en su interior. En a) se ve que las dos ramas están abiertas a la atmósfera y, de ese modo, reciben la misma presión y están a igual nivel. En b) se ha conectado una de las ramas, por medio de un tubo lleno de solución salina y una aguja hipodérmica, a la arteria de un sujeto. Se ve que el nivel de líquido en la rama izquierda bajó y en la rama derecha subió. La diferencia de altura, medida con una simple regla, nos da los "mm de mercurio" de presión. En este ejemplo 100 mm Hg [47].

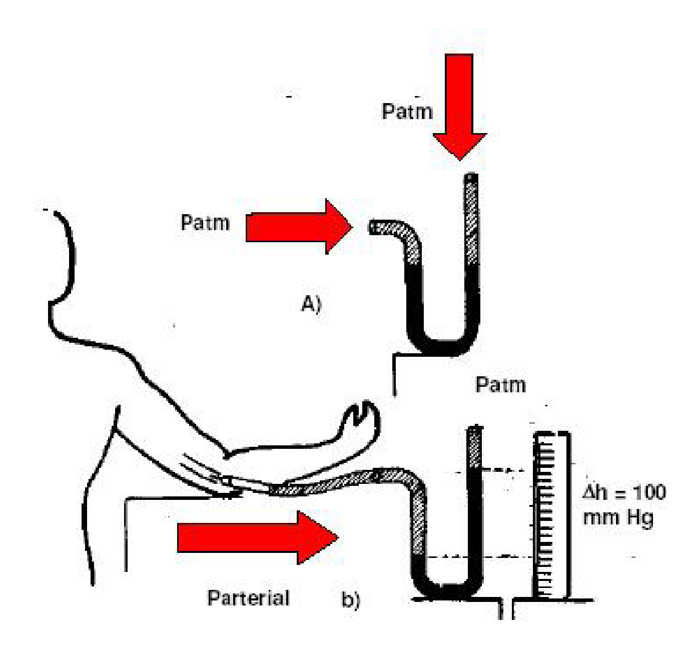


Figura.7- Medición de la presión arterial (método directo - una aguja insertada en la arteria) Se mide por la diferencia de altura de las 2 ramas

Pero ¿qué es una presión? La presión es una magnitud intensiva (en el fondo de un recipiente hay la misma presión en 1 cm^2 que en 1 m^2 o en 1 km^2) y es:

$$\textbf{Presión (P)} = \frac{\textbf{fuerza (F)}}{\textbf{área (A)}}$$

De acuerdo al SI (Sistema Internacional) su unidad es el **Pascal (Pa)**

P = Newton. M^{-2} = Pa y el **kilopascal**

P = 1000 N . m^{-2} = kPa

La *velocidad* de la sangre se determina, como en cualquier otro sistema, sabiendo el tiempo que tarda una partícula en recorrer una cierta distancia.

$$\textbf{Velocidad} = v = \frac{\textbf{distancia}}{\textbf{tiempo}} = \frac{d}{t}$$

Por supuesto que, calculada de esa manera, se trata de una velocidad media (medida en la aorta) y la sangre tendrá una velocidad mayor durante la sístole y menor durante la diástole. La unidad habitual es cm/s y la velocidad media de la sangre en la aorta es del orden de los 40 a 50 cm/s, mientras que en los capilares es 0,02 a 0,06 cm/s. En la figura 8 se muestra la velocidad de la sangre en cada uno de los segmentos del sistema circulatorio. Si se la compara con la figura 5 se verá que una es la inversa de la otra: cuando el área de sección transversal de todos los vasos aumenta, como en los capilares, la velocidad disminuye y cuando el área de sección transversal disminuye, como en el territorio venoso, la velocidad aumenta.

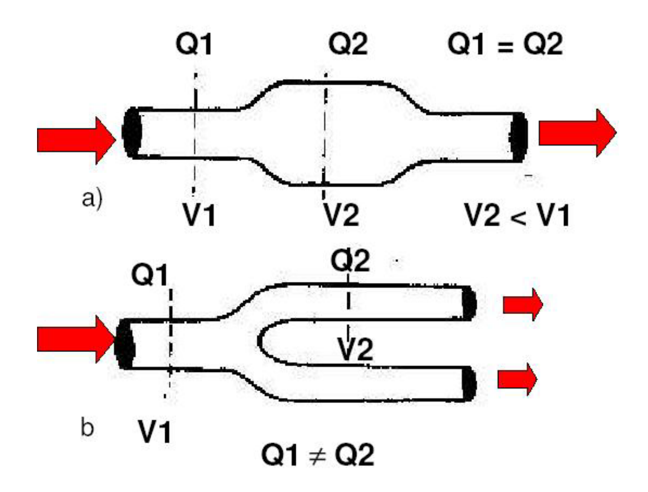


Figura.8- La ecuación de continuidad sólo se cumple en los segmentos de igual caudal (panel a)

Esta relación inversa entre área de sección y velocidad sólo es válida si entre uno y otro territorio el caudal es el mismo. En la figura 9 se muestran dos casos. En a) el caudal en 1

es el mismo que en 2 y como el área en 2 es mayor que el área en 1, la velocidad en 2 es menor que la velocidad en 1, de modo que se cumple:

$$Q_1 = Q_2 = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_1$$

Ya que **Caudal = $cm^3 . s^{-1}$; Velocidad = $cm . s^{-1}$; Area = cm^2**

$$Q = Velocidad \cdot área = cm.s^{-1}.cm^{-2}$$

$$Q = cm^3 . s^{-1}$$

El producto velocidad por área es la *ecuación de continuidad*, y no se puede aplicar en el caso b) para calcular la velocidad en una rama, ya que en esa rama el caudal es distinto al caudal en el tronco. Para el caso de los capilares, sabemos que el caudal en todos los capilares es igual al gasto cardíaco y, entonces, la relación inversa ente entre velocidad y área sí se cumple. Pese a que cada uno de los capilares tiene un diámetro pequeño, a los fines hemodinámicos el conjunto de los capilares se comporta como un gran lago donde desembocan varios ríos de corriente muy rápida: la velocidad disminuye. [48]

Desde el punto de vista hidrodinámico, el trabajo o energía **E** necesario para desplazar un cierto volumen (**V**) es igual a

$$E = P \cdot V$$

Donde **P** es presión y **V** es volumen.

A este trabajo habrá que agregar el trabajo necesario para que el líquido adquiera una cierta velocidad **v** y la energía total será:

$$Et = E + Ec$$

Como el corazón es una bomba cíclica, sólo es válido calcular la energía consumida durante la fase de expulsión (sístole). El volumen desplazado será el volumen sistólico y la presión, a presión media. De ese modo, para el ventrículo izquierdo y estando el sujeto en reposo:

$$\mathbf{E = P . V = 100\ mm\ Hg\ .\ 62{,}5\ cm3/latido}$$

Para calcular **Ec** debemos conocer la densidad de la sangre (δ= 1.055 g/cm^3)y la velocidad con que la sangre pasa por la válvula aórtica (50 cm/seg).Entonces:

$$\mathbf{Ec = 1/2\ \Delta v^2 = 1/2\ .\ 1{,}055\ g/cm^3\ .\ 2500\ cm^2.s^2 = 1{,}318\ .\ 10^{-4}\ joule/latido}$$

$$\mathbf{Etotal = E + Ec = 0{,}833 + 1{,}318\ .\ 10^{-4} = 0{,}833\ joule/latido}$$

La energía utilizada por el ventrículo izquierdo en 1 minuto será de 66,6 joule. Como se ve el trabajo cardiaco está dado fundamentalmente por energía gastada para desplazar un volumen, mientras que la velocidad que adquiere la sangre influye muy poco. Este es el trabajo hidráulico o hemodinámico que no debe confundirse con la energía metabólica que utiliza el músculo cardíaco para mover la sangre. Esta se calcula a partir del consumo de oxigeno y el cociente entre la energía hidráulica y la metabólica nos indicará la eficiencia del corazón como bomba.

$$Eficiencia = \frac{E\ hidráulica}{E\ metabólica}$$

Un ejemplo de la aplicabilidad del teorema de Bernoulli es el mecanismo de formación de un aneurisma. Por alguna razón patológica, un segmento arterial, generalmente de la aorta abdominal, comienza a dilatarse (figura 9). El caudal es el mismo en la aorta y en el aneurisma (**Q1 = Q2**), pero la velocidad es menor en el aneurisma y la presión hidrostática **P** aumenta, lo que lleva al aneurisma a dilatarse aún más, lo que hace que la velocidad disminuya aún más, etc. Es un círculo vicioso que, si no se corrige, puede provocar la

ruptura de la arteria. Una aplicación reciente del teorema de Bernoulli es el cálculo del grado de estrechez en una válvula cardiaca usando la ecocardiografía doppler. Allí lo que se mide es la velocidad del flujo y de ella se deduce la diferencia de presiones entre ambos lados de la válvula [49].

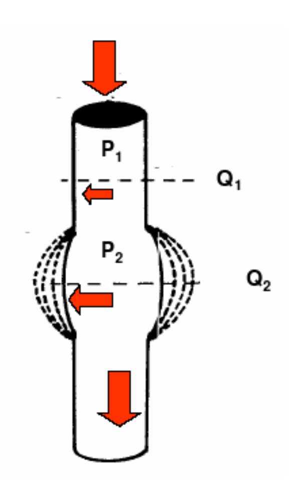


Figura.9 Presiones en un aneurisma

No se puede usar Bernouilli para comparar presiones entre la ilíaca izquierda, por ejemplo, y la aorta, simplemente porque el caudal no es el mismo.

Es un error frecuente decir que la presión **P** en los capilares es alta porque el área de sección transversal de *todos* los capilares es mayor que la sección de la aorta. Si bien la velocidad en los capilares es baja, el caudal de un capilar es millones de veces menor que el caudal de la aorta, la presión capilar es 25-30 mm Hg y *nunca* puede ser mayor a la aórtica. Hablar de ecuación de continuidad y conservación de la energía entre la aorta y un capilar carece de sentido [50].

Limitada, de esa manera, la aplicación del Teorema de Bernoulli a segmentos de arterias o venas con distinto radio, pero igual caudal, queda por resolver la cuestión del líquido ideal. La sangre dista mucho de ser un líquido ideal porque tiene una viscosidad 2 a 4,5 veces mayor que la del agua... y el agua ya tiene viscosidad. ¿Qué ocurre con **P** en un tubo con 3 secciones pero recorrido por un liquido real, con viscosidad? Pues que **P1** será menor que

P3, pese a que el diámetro de 3 es igual al de 1 (figura 10). Esto es debido a que, en estas condiciones, cuando el líquido tiene viscosidad:

$$E1 > E2 \;\; y \;\; E1 = E3 + E\eta$$

donde **Eη** es la energía que se pierde por efecto de la viscosidad. De ese modo aparece, entre 1 y 3, una **ΔP**, una diferencia de presión.

Pero esto no es nada nuevo: es simplemente la diferencia de presión que hace circular el líquido venciendo la resistencia que le ofrece la viscosidad y que se puede calcular por

$$\Delta P = \frac{8\, l\, \eta}{\pi\, r^4}$$

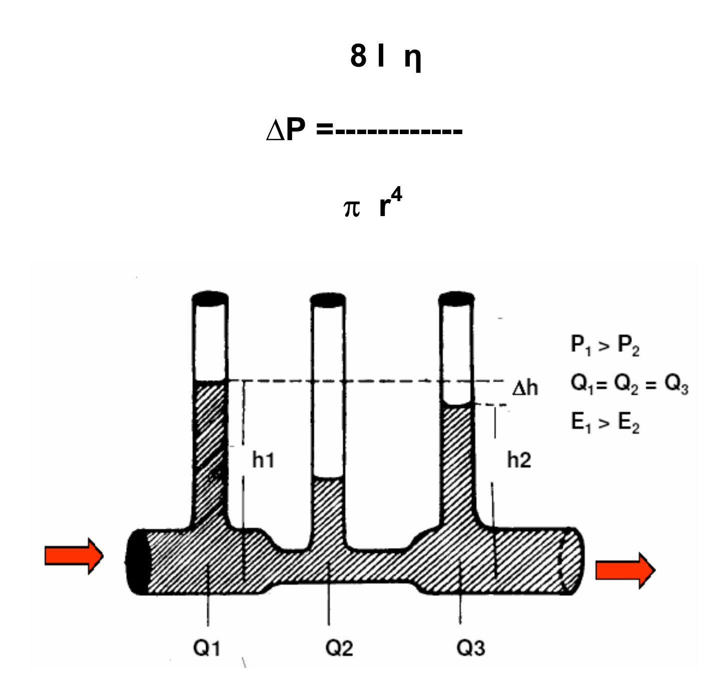


*Figura.10- Caudales y presiones en un tubo de ****Venturi*** *por el que circula un fluido* ***real, con viscosidad****. La presión cae en 2, pero no vuelve al valor que tenia en 1 por la pérdida de energía*

**Giovanni Battista Venturi (1746-1822), físico italiano inventor del llamado tubo de Venturi, empleado en hidráulica. Especialista en dinámica de fluidos, orientó sus trabajos de investigación hacia la hidráulica. Se distinguió en esa disciplina al inventar y fabricar el llamado tubo de Venturi, una tubería dotada de un estrangulamiento. El tubo de Venturi se emplea para medir el caudal de un fluido*

Tensión, elasticidad y distensibilidad de los vasos sanguíneos:

Tensión y Ley de Laplace: Todos los vasos sanguíneos son, en mayor o menor grado, estructuras *elásticas*. Eso quiere decir que su diámetro no es fijo ni constante sino que depende de la relación que haya, en un momento dado, entre la *presión* dentro del vaso y la *tensión de la pared.* El término *presión* es la fuerza que se ejerce sobre un *área* determinada. La *tensión* por su parte, es la fuerza que se ejerce sobre una longitud determinada. En un vaso sanguíneo, para que exista y se mantenga un diámetro de, por ejemplo, 2 mm, debe haber un equilibrio entre **t** y **P**.

En la figura 11 se ha representado un vaso sanguíneo como formado como dos mitades: la presión tiende a separarlas y la tensión a mantenerlas juntas. Mientras **P** es la fuerza aplicada en la superficie interior, **t** es la fuerza ejercida en forma tangencial a la superficie del vaso y aplicada a la línea de separación.

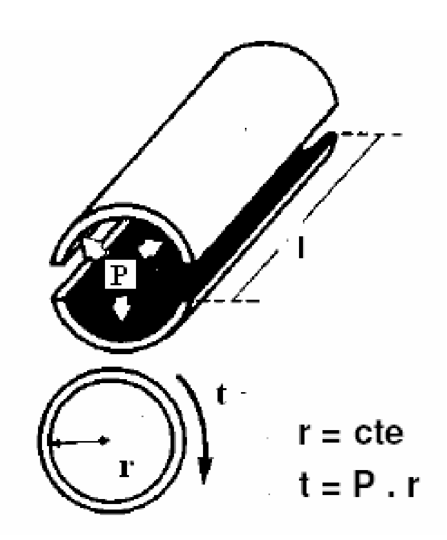


Figura.11- *Ley de Laplace aplicada a un tubo. El equilibrio se logra cuando* ***t = P. r***

Lo que sí se puede decir es que el radio del tubo se mantiene cuando el producto de la presión por el radio es igual a la tensión.

Esto es conocido como la Ley de **Laplace* y se escribe:

$$t = P \cdot r$$

Una importantísima conclusión a sacar de esta ley es que los vasos de pequeño radio necesitan mucha menos tensión que los vasos de gran radio para soportar la misma presión y mantener su radio constante. Imaginemos dos vasos totalmente distintos: la aorta y un capilar. Sus características se muestran en la tabla 1

	Presion		**Radio**
	mm Hg	dina/cm^2	cm
Aorta	100	1033.10^5	1
Capilar	25	$0.33.10^5$	7.10^{-4}

Tabla1

CAPÍTULO III

Física de la visión

I- Conceptos físicos fundamentales de óptica.

La luz y los fenómenos relacionados con ella han desempeñado un papel fundamental en la evolución y el desarrollo de la humanidad. Difícil sería imaginar un mundo envuelto en la eterna oscuridad; lo que sí es claro es que sería muy diferente del mundo en que vivimos... y mucho menos interesante. La física macroscópica llegó a establecer sus leyes viendo a los objetos. De esta manera, Galileo estableció la ley de la caída libre de los cuerpos y Kepler encontró las leyes del movimiento de los planetas.

**Pierre-Simon Laplace (1749-1827) astrónomo, físico y matemático francés que inventó y desarrolló la Transformada de Laplace y la ecuación de Laplace*

El agente que lleva la información del sistema físico al observador, al físico o astrónomo experimental, es la luz que penetra su sentido de la visión. Tomando esto en cuenta, no es de sorprender que la óptica haya surgido como una de las primeras ramas de las ciencias naturales, desde épocas muy remotas el hombre se ha sentido atraído por los fenómenos luminosos, que despertaban en él gran curiosidad y, que le aportaban, además, una variedad de beneficios prácticos.

La Óptica es la rama de la física que se ocupa de la propagación y el comportamiento de la luz. En un sentido amplio, la luz es la zona del espectro de radiación electromagnética que se extiende desde los rayos X hasta las microondas, e incluye la energía radiante que produce la sensación de visión. El estudio de la óptica se divide en dos ramas, la óptica geométrica y la óptica física. La reflexión y la refracción por un lado, y las interferencias y la difracción por otro, son algunos de los fenómenos ópticos fundamentales. Los primeros pueden estudiarse siguiendo la marcha de los rayos luminosos; los segundos se interpretan recurriendo a la descripción en forma de onda. El conocimiento de las leyes de la óptica permite comprender cómo y por qué se forman esas imágenes, que constituyen para el hombre la representación más valiosa de su mundo exterior. La óptica, o estudio de la luz, constituye un ejemplo de ciencia milenaria. Ya **Arquímedes* en el siglo III antes de Cristo era capaz de utilizar con fines bélicos los conocimientos entonces disponibles sobre la marcha de los rayos luminosos a través de espejos y lentes.

**Arquímedes (287-212 a.C.), notable matemático e inventor griego, que escribió importantes obras sobre geometría plana y del espacio, aritmética y mecánica.*

Sin planteamientos muy elaborados sobre cuál fuera su naturaleza, los antiguos aprendieron, primero, a observar la luz para conocer su comportamiento y, posteriormente, a utilizarla con diversos propósitos. Es a partir del siglo XVII con el surgimiento de la ciencia moderna, cuando el problema de la naturaleza de la luz cobra una importancia singular como objeto del conocimiento científico.

I.1-Naturaleza de la luz

En 1864 ya estaba aceptada la teoría ondulatoria; sin embargo, era completamente desconocido el tipo de onda que era la luz. En este año el físico escocés **James Clerk Maxwell* planteó su teoría electromagnética de la luz, con la que probó que la luz es una onda electromagnética transversal de la misma naturaleza que las ondas de radio, que aún no se habían descubierto, diferenciándose de éstas sólo en que su frecuencia es mucho mayor. Maxwell tuvo tanto éxito con su teoría que pudo explicar cualitativa y cuantitativamente todos los fenómenos luminosos conocidos entonces y aun predecir otros más. Lo más interesante fue que obtuvo el valor de la velocidad en el vacío calculándola teóricamente a partir de constantes eléctricas conocidas del vacío. En 1883, ***Gustav Kirchhoff* derivó en Berlín su teoría escalar de la difracción.

**James Clerk Maxwell (1831-1879), físico escosés cuyas investigaciones y escritos explican las propiedades del electromagnetismo. Estos trabajos le convirtieron en uno de los científicos más importantes del siglo XIX.*
***Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), físico alemán. Con el químico alemán Robert Wilhelm Bunsen, desarrolló el espectroscopio moderno para el análisis químico. Kirchhoff dirigió importantes investigaciones sobre la transferencia de calor y también expuso dos reglas, actualmente conocidas como leyes de Kirchhoff, con respecto a la distribución de corriente en circuitos eléctricos.*

Esta teoría se puede considerar como una aproximación a la de Maxwell o como una mejoría de la de **Fresnel*. ***Heinrich Rudolph Hertz* en 1886 demostró experimentalmente la existencia de las ondas de radio, confirmando así sin lugar a dudas la teoría electromagnética de Maxwell.

La interpretación efectuada por ****Albert Einstein* del *****efecto fotoeléctrico* fue indiscutible, pero también lo era la teoría de Maxwell de las ondas electromagnéticas.

Ambas habían sido el producto final de la evolución de dos modelos científicos para la luz, en un intento de ajustarlos con más fidelidad a los resultados de los experimentos. Ambos explican la realidad, a pesar de lo cual parecen incompatibles.

Sin embargo, cuando se analiza la situación resultante prescindiendo de la idea de que un modelo deba prevalecer necesariamente sobre el otro, se advierte que de los múltiples fenómenos en los que la luz se manifiesta, unos, como las interferencias o la difracción, pueden ser descritos únicamente admitiendo el carácter ondulatorio de la luz, en tanto que otros, como el efecto fotoeléctrico, se acoplan sólo a una imagen corpuscular.

**Augustin Fresnel (1788-1827), físico francés partidario de la teoría ondulatoria de la luz. Hizo numerosos experimentos con las interferencias luminosas.*

***Heinrich Hertz (1857-1894), físico alemán. Hertz clarificó y extendió la teoría electromagnética de la luz, Hertz demostró que la electricidad puede transmitirse en forma de ondas electromagnéticas, las cuales se propagan a la velocidad de la luz y tienen además muchas de sus propiedades.*

****Albert Einstein (1879-1955), físico alemán nacionalizado estadounidense, premiado con un Nóbel, famoso por ser el autor de las teorías general y restringida de la relatividad y por sus hipótesis sobre la naturaleza corpuscular de la luz. Es probablemente el científico más conocido del siglo XX.*

*****Efecto fotoeléctrico, formación y liberación de partículas eléctricamente cargadas que se produce en la materia cuando es irradiada con luz u otra radiación electromagnética*

No obstante, entre ambos se obtiene una idea más completa de la naturaleza de la luz. Se dice por ello que son complementarios. Las controversias y los antagonismos entre las ideas de Newton y **Huygens* han dejado paso, al cabo de los siglos, a la síntesis de la física actual.

La luz es, por tanto, onda, pero también corpúsculo, manifestándose de uno u otro modo en función de la naturaleza del experimento o del fenómeno mediante el cual se la pretende caracterizar o describir. Por lo tanto la energía radiante tiene una naturaleza dual, y obedece leyes que pueden explicarse a partir de una corriente de partículas o paquetes de energía, los llamados fotones, o a partir de un tren de ondas transversales. El concepto de fotón se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía.

En las ondas de luz, como en todas las ondas electromagnéticas, existen campos eléctricos y magnéticos en cada punto del espacio, que fluctúan con rapidez. Como estos campos tienen, además de una magnitud, una dirección determinada, son cantidades vectoriales. Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y también perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Figura 1

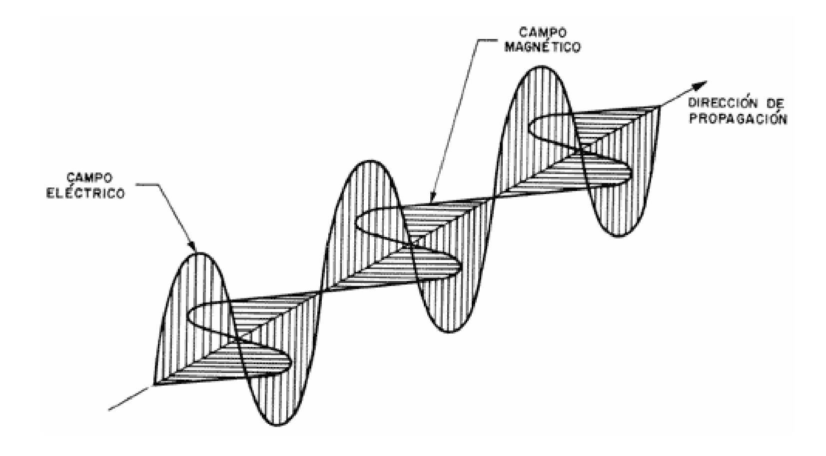


Figura 1- Onda luminosa, con el campo eléctrico vertical y el campo magnético horizontal

---

**Christiaan Huygens (1629-1695), astrónomo, matemático y físico holandés*

La onda luminosa más sencilla es una onda sinusoidal pura, llamada así porque una gráfica de la intensidad del campo eléctrico o magnético trazada en cualquier momento a lo largo de la dirección de propagación sería la gráfica de una función seno. El número de oscilaciones o vibraciones por segundo en un punto de la onda luminosa se conoce como frecuencia ***V***. La longitud de onda **λ** como se muestra en la figura 2 es la distancia a lo largo de la dirección de propagación entre dos puntos con la misma 'fase', es decir, puntos que ocupan posiciones equivalentes en la onda. [51]

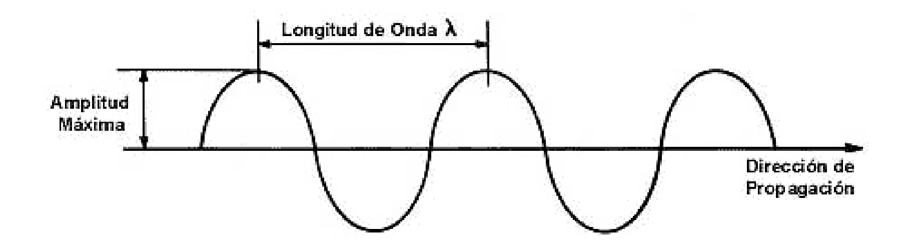


Figura.2- Parámetros importantes en una onda.

Estas dos cantidades no son independientes, sino que están relacionadas entre sí por la velocidad ***v***, con la que se propaga la luz. Si el medio en el que viaja la luz es el vacío, esta velocidad se representa por **C** y tiene un valor de 299 792 kilómetros por segundo. La distancia de la Tierra a la Luna es aproximadamente de 384 500 kilómetros, por lo que la luz atraviesa esa distancia en poco más de un segundo. Otra manera de imaginar la magnitud de la velocidad de la luz es pensar que esta distancia corresponde aproximadamente a ocho vueltas alrededor de la Tierra. La fórmula que relaciona estos tres conceptos básicos de una onda es:

$$\lambda\, \nu = c$$

Las ondas electromagnéticas se producen de diferentes maneras, por vibraciones eléctricas, procesos nucleares, etc.; y tienen un amplio intervalo de longitudes de onda (espectro electromagnético) en el que hay un pequeño espacio donde se tornan visibles; o sea, son

detectadas por el ojo humano y podemos observar diferentes colores, a cada uno de los cuales le corresponden varias longitudes de onda (espectro continuo).

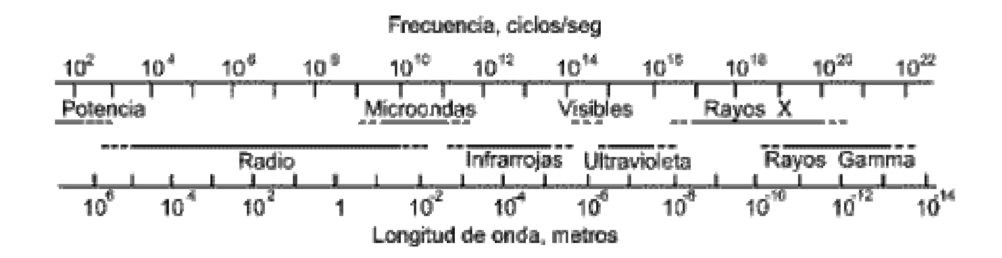


Figura.3-Representación de la frecuencia y las longitudes de onda (espectro electromagnético).

I.2-La propagación de la luz

La luz emitida por las fuentes luminosas es capaz de viajar a través de materia o en ausencia de ella, aunque no todos los medios permiten que la luz se propague por ellos. Desde este punto de vista, las diferentes sustancias materiales se pueden clasificar en *opacas, transparentes* y *traslucidas*. Aunque la luz es incapaz de traspasar las opacas, puede atravesar las otras. Las sustancias transparentes tienen, además, la propiedad de que la luz sigue en su interior una sola dirección. Este es el caso del agua, el vidrio o el aire. En cambio, en las traslucidas la luz se dispersa, lo que da lugar a que a través de ellas no se puedan ver las imágenes con nitidez. El papel vegetal o el cristal esmerilado constituyen algunos ejemplos de objetos traslúcidos [52].

En un medio que además de ser transparente sea homogéneo, es decir, que mantenga propiedades idénticas en cualquier punto del mismo, la luz se propaga en línea recta. Esta característica, conocida desde la antigüedad, constituye una *ley fundamental* de la óptica geométrica. Dado que la luz se propaga en línea recta, para estudiar los fenómenos ópticos de forma sencilla, se acude a algunas simplificaciones útiles.

Así, las fuentes luminosas se consideran *puntuales*, esto es, como si estuvieran concentradas en un punto, del cual emergen *rayos de luz* o líneas rectas que representan

las direcciones de propagación. Un conjunto de rayos que parten de una misma fuente se denomina haz.

Cuando la fuente se encuentra muy alejada del punto de observación, a efectos prácticos, los haces se consideran formados por rayos paralelos. Si por el contrario la fuente está próxima, la forma del haz es cónica.

I.3-Velocidad e índice de refracción

La velocidad con que la luz se propaga a través de un medio homogéneo y transparente es una constante característica de dicho medio, y por tanto, cambia de un medio a otro. En la antigüedad se pensaba que su valor era infinito, lo que explicaba su propagación instantánea. Debido a su enorme magnitud la medida de la velocidad de la luz c ha requerido la invención de procedimientos ingeniosos que superasen el inconveniente que suponen las cortas distancias terrestres en relación con tan extraordinaria rapidez. Métodos astronómicos y métodos terrestres han ido dando resultados cada vez más próximos. En la actualidad se acepta para la velocidad de la luz en el vacío el valor c = 300 000 km/s. En cualquier medio material transparente la luz se propaga con una velocidad que es siempre inferior a c. Así, por ejemplo, en el agua lo hace a 225 000 km/s y en el vidrio a 195 000 km/s. En óptica se suele comparar la velocidad de la luz en un medio transparente con la velocidad de la luz en el vacío, mediante el llamado *índice de refracción absoluto* N del medio: se define como el cociente entre la velocidad c de la luz en el vacío y la velocidad v de la luz en el medio, es decir:

$$N = c/v$$

Dado que **c** es siempre mayor que **v**, **N** resulta siempre mayor o igual que la unidad. Conforme se deduce de la propia definición cuanto mayor sea el índice de refracción absoluto de una sustancia tanto más lentamente viajará la luz por su interior. Si lo que se

pretende es comparar las velocidades $\mathbf{v_1}$ y $\mathbf{v_2}$ de dos medios diferentes se define entonces el índice de refracción relativo del medio 1 respecto del 2 como cociente entre ambas:

$$n_{12} = n_1/n_2$$

ó en términos de índices de refracción absolutos:

$$n_{12} = (c/n_1)/(c/n_2) \Rightarrow n_{12} = n_2/n_1$$

Un índice de refracción relativo n_{12} menor que 1 indica que en el segundo medio la luz se mueve más rápidamente que en el primero.

I.4-La reflexión de la luz

Al igual que la reflexión de las ondas sonoras, la reflexión luminosa es un fenómeno en virtud del cual la luz al incidir sobre la superficie de los cuerpos cambia de dirección, invirtiéndose el sentido de su propagación. En cierto modo se podría comparar con el rebote que sufre una bola de billar cuando es lanzada contra una de las bandas de la mesa. La visión de los objetos se lleva a cabo precisamente gracias al fenómeno de la reflexión. Un objeto cualquiera, a menos que no sea una fuente en sí mismo, permanecerá invisible en tanto no sea iluminado. Los rayos luminosos que provienen de la fuente se reflejan en la superficie del objeto y revelan al observador los detalles de su forma y su tamaño.

De acuerdo con las características de la superficie reflectora, la reflexión luminosa puede ser regular o difusa. La *reflexión regular* tiene lugar cuando la superficie es perfectamente lisa. Un espejo o una lámina metálica pulimentada reflejan *ordenadamente* un haz de rayos conservando la forma del haz. *La reflexión difusa* se da sobre los cuerpos de superficies más o menos rugosas. En ellas un haz paralelo, al reflejarse, se dispersa orientándose los rayos en direcciones diferentes. Esta es la razón por la que un espejo es capaz de reflejar la imagen de otro objeto en tanto que una piedra, por ejemplo, sólo refleja su propia imagen [53].

Sobre la base de las observaciones antiguas se establecieron las leyes que rigen el comportamiento de la luz en la reflexión regular o especular. Se denominan genéricamente *leyes de la reflexión*. Si **S** es una superficie especular (representada por una línea recta rayada del lado en que no existe la reflexión), se denomina *rayo incidente* al que llega a ***S***, *rayo reflejado* al que emerge de ella como resultado de la reflexión y punto de incidencia **O** al punto de corte del rayo incidente con la superficie **S**. La recta **N**, perpendicular a **S** por el punto de incidencia, se denomina normal.

El ángulo de incidencia **i** es el formado por el rayo incidente y la normal. El *ángulo de* reflexión **r** es el que forma la normal y el rayo reflejado. Con la ayuda de estos conceptos auxiliares pueden anunciarse las leyes de la reflexión en los siguientes términos:

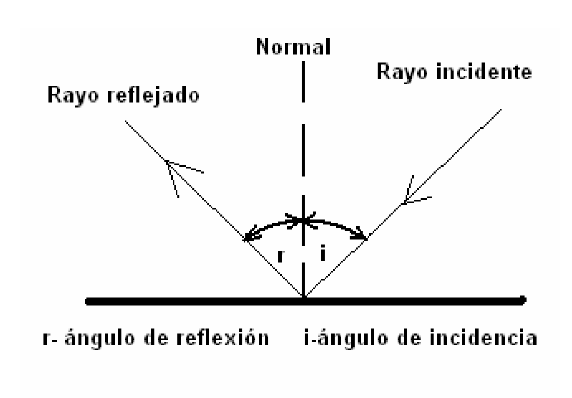


Figura 4- Leyes fundamentales de la reflexión

1.ª Ley. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran sobre un mismo plano.

2.ª Ley. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (i = r)

I.5-La refracción de la luz

Se denomina refracción luminosa al cambio que experimenta la dirección de propagación de la luz cuando atraviesa oblicuamente la superficie de separación de dos medios transparentes de distinta naturaleza. Las lentes, las máquinas fotográficas, el ojo humano y, en general, la mayor parte de los instrumentos ópticos basan su funcionamiento en este

fenómeno óptico. El fenómeno de la refracción va, en general, acompañado de una reflexión, más o menos débil, producida en la superficie que limita los dos medios transparentes. El haz, al llegar a esa superficie límite, en parte se refleja y en parte se refracta, lo cual implica que los haces reflejado y refractado tendrán menos intensidad luminosa que el rayo incidente. Dicho reparto de intensidad se produce en una proporción que depende de las características de los medios en contacto y del ángulo de incidencia respecto de la superficie límite. A pesar de esta circunstancia, es posible fijar la atención únicamente en el fenómeno de la refracción para analizar sus características [54].

I.6-Las leyes de la refracción

Al igual que las leyes de la reflexión, las de la refracción poseen un fundamento experimental. Junto con los conceptos de rayo incidente, normal y ángulo de incidencia, es necesario considerar ahora el rayo refractado y el ángulo de refracción o ángulo que forma la normal y el rayo refractado.

Ley de Snell: Esta importante ley, llamada así en honor del matemático holandés *Willebrord van Roijen Snell* (1591-1626), afirma que el producto del índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia de un rayo es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo de refracción. El rayo incidente, el rayo refractado y la normal a la superficie de separación de los medios en el punto de incidencia están en un mismo plano. En general, el índice de refracción de una sustancia transparente más densa es mayor que el de un material menos denso, es decir, la velocidad de la luz es menor en la sustancia de mayor densidad.

Por tanto, si un rayo incide de forma oblicua sobre un medio con un índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal, mientras que si incide sobre un medio con un índice de

refracción menor, se desviará alejándose de ella. Los rayos que inciden en la dirección de la normal son reflejados y refractados en esa misma dirección.

Para un observador situado en un medio menos denso, como el aire, un objeto situado en un medio más denso parece estar más cerca de la superficie de separación de lo que está en realidad. Un ejemplo habitual es el de un objeto sumergido, observado desde encima del agua, como se muestra en la figura 5 (sólo se representan rayos oblicuos para ilustrar el fenómeno con más claridad). El rayo *DB* procedente del punto *D* del objeto se desvía alejándose de la normal, hacia el punto *A.* Por ello, el objeto parece situado en *C,* donde la línea *ABC* intersecta una línea perpendicular a la superficie del agua y que pasa por *D.* [55]

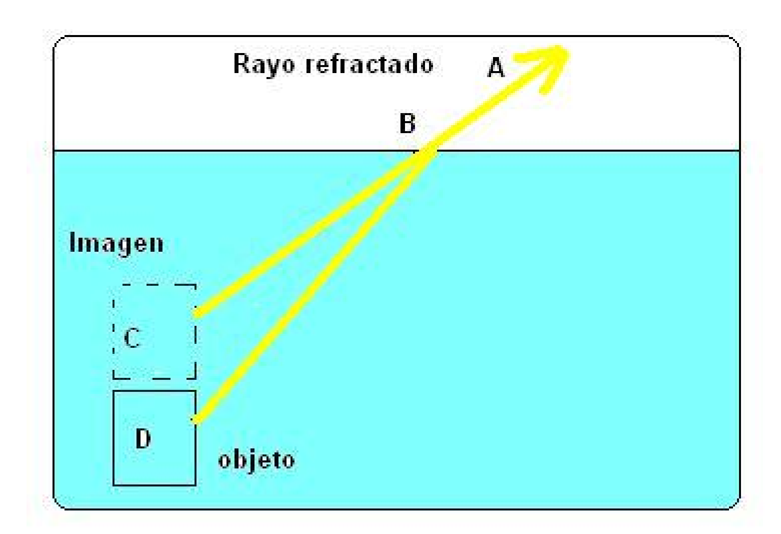


Figura 5- Como resultado de la refracción, el objeto sumergido parece estar más cerca del agua

Sean **1** y **2** dos medios transparentes en contacto que son atravesados por un rayo luminoso en el sentido de **1** a **2** y φ_1 y φ_2 los ángulos de incidencia y refracción respectivamente. Las leyes que rigen el fenómeno de la refracción pueden, entonces, expresarse en la forma:

1.ª Ley. El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran en el mismo plano.

2.ª Ley. (ley de Snell) Los senos de los ángulos de incidencia φ_1 y de refracción φ_2 son directamente proporcionales a las velocidades de propagación v_1 y v_2 de la luz en los respectivos medios.

$$\text{sen } \varphi_1/\text{sen } \varphi_2 = v_1/v_2$$

Recordando que índice de refracción y velocidad son inversamente proporcionales **N=c/v** la segunda ley de la refracción se puede escribir en función de los índices de refracción en la forma:

$$\text{sen } \varphi_1/\text{sen } \varphi_2 = (c/n_1)/(c/n_2) = n_2/n_1$$

ó en otros términos

$$n_1.\text{sen } \varphi_1 = n_2.\text{sen } \varphi_2 = \text{constante}$$

Esto indica que el producto del seno del ángulo φ por el índice de refracción del medio correspondiente es una cantidad constante y, por tanto, los valores de **n** y **sen φ** para un mismo medio son inversamente proporcionales. Debido a que la función trigonométrica seno es creciente para ángulos menores de 90°, de la última ecuación se deduce que si el índice de refracción $\mathbf{n_1}$ del primer medio es mayor que el del segundo $\mathbf{n_2}$, el ángulo de refracción φ_2 es mayor que el de incidencia φ_1 y, por tanto, *el rayo refractado se aleja de la normal*.

Por el contrario, si el índice de refracción $\mathbf{n_1}$ del primer medio es menor que el del segundo $\mathbf{n_2}$, el ángulo de refracción φ_2 es menor que el de incidencia el y el rayo refractado se acerca a la normal. Estas reglas prácticas que se deducen de la última ecuación son de mucha utilidad en la representación de la marcha de los rayos, operación imprescindible en el estudio de cualquier fenómeno óptico desde la perspectiva de la óptica geométrica. La refringencia de un medio transparente viene medida por su índice de refracción. Los medios más refringentes son aquellos en los que la luz se propaga a menor velocidad; se dice también que tienen una mayor *densidad óptica*. Por regla general, la refringencia de un medio va ligada a su densidad de materia, pues la luz encontrará más dificultades para

propagarse cuanta mayor cantidad de materia haya de atravesar para una misma distancia. Así pues, a mayor densidad, menor velocidad y mayor índice de refracción o grado de refringencia.

I.7-La primera determinación experimental de la velocidad de la luz

En el año 1672 el astrónomo danés *Olaus Roemer* (1644-1710), consiguió realizar la primera determinación de la velocidad de la luz, considerando para ello distancias interplanetarias. Al estudiar el periodo de revolución de un satélite (tiempo que emplea en describir una órbita completa) del planeta Júpiter, observó que variaba con la época del año entre dos valores extremos. Roemer interpretó este hecho como consecuencia de que la Tierra, debido a su movimiento de traslación en torno al Sol, no se encontraba siempre a la misma distancia del satélite, sino que ésta variaba a lo largo del año. Los intervalos medidos representaban realmente la suma del periodo de revolución más el tiempo empleado por la luz en recorrer la distancia entre el satélite y la Tierra. Por esta razón la luz procedente del satélite tardaría más tiempo en llegar al observador cuando éste se encontrase en la posición más alejada, lo que se traduciría en un intervalo de tiempo algo más largo.

I.8-Ángulo límite o crítico

Puesto que los rayos se alejan de la normal cuando entran en un medio menos denso, y la desviación de la normal aumenta a medida que aumenta el ángulo de incidencia, hay un determinado ángulo de incidencia, denominado ángulo crítico o ángulo límite, para el que el rayo refractado forma un ángulo de 90º con la normal, por lo que avanza justo a lo largo de la superficie de separación entre ambos medios. Si el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, los rayos de luz serán totalmente reflejados. La reflexión total no puede producirse cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso. Las tres

ilustraciones de la figura 6 muestran la refracción ordinaria, la refracción en el ángulo crítico y la reflexión total. [56]

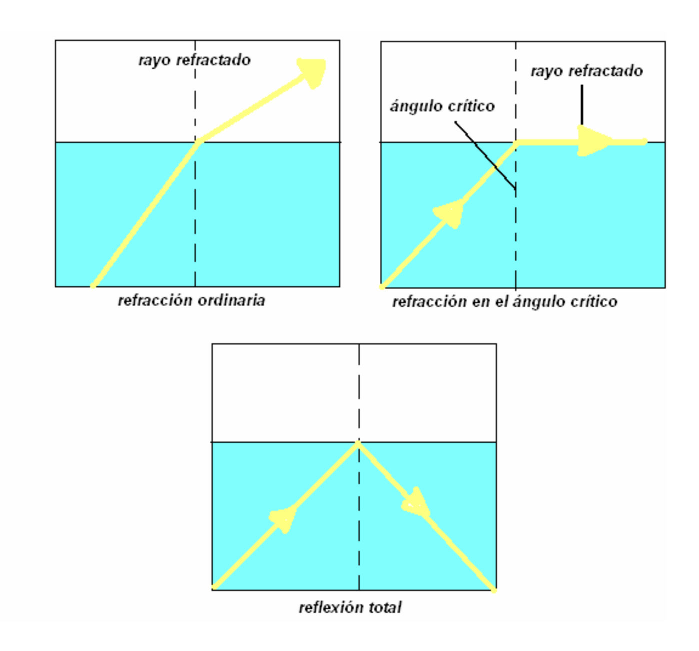


Figura.6- Ángulo crítico

I.9-Fibra óptica

Fibra o varilla de vidrio u otro material transparente con un índice de refracción alto que se emplea para transmitir luz. Cuando la luz entra por uno de los extremos de la fibra, se transmite con muy pocas pérdidas incluso aunque la fibra esté curvada. El principio en que se basa la transmisión de luz es la reflexión total interna; la luz que viaja por el centro de la fibra incide sobre la superficie externa con un ángulo mayor que el ángulo crítico, de forma que se refleja sin pérdidas hacia el interior. Así, la luz se transmite a largas distancias, reflejándose miles de veces en el interior de la fibra.

La aplicación más sencilla de la fibra óptica es la transmisión de luz a lugares que serían difíciles de iluminar de otro modo, como la cavidad perforada por el rotor de un dentista. También puede emplearse para transmitir imágenes. En este caso se utilizan haces de varios miles de fibras muy finas, situadas exactamente una al lado de la otra y pulidas en sus extremos. Cada punto de la imagen proyectada sobre un extremo del haz se reproduce

en el otro extremo, con lo que se reconstruye la imagen, que puede ser observada a través de una lupa o en una pantalla. Este procedimiento es muy utilizado en instrumentos médicos para examinar el interior del cuerpo humano. La fibra óptica se emplea cada vez más en las comunicaciones, debido a que las ondas de luz tienen una frecuencia muy alta y la capacidad de una señal para transportar información aumenta con la frecuencia. En las últimas décadas se han ido sustituyendo las líneas de transmisión que utilizan conductores metálicos por redes de fibra óptica, que proporcionan conexiones telefónicas, correo electrónico e Internet transcontinentales y transoceánicas.



Figura.7- Fibra óptica

I.10-Objetos e imágenes

En ocasiones los rayos de luz que, procedentes de un objeto, alcanzan el ojo humano y forman una imagen en él, han sufrido transformaciones intermedias debidas a fenómenos ópticos tales como la reflexión o la refracción. Todos los aparatos ópticos, desde el más sencillo espejo plano al más complicado telescopio, proporcionan imágenes más o menos modificadas de los objetos.

La determinación de las relaciones existentes entre un objeto y su imagen correspondiente, obtenida a través de cualquiera de estos elementos o sistemas ópticos, es uno de los

propósitos de la óptica geométrica. Su análisis riguroso se efectúa, en forma matemática, manejando convenientemente el carácter rectilíneo de la propagación luminosa junto con las leyes de la reflexión y de la refracción. Pero también es posible efectuar un estudio grafico de carácter práctico utilizando *diagramas de rayos*, los cuales representan la marcha de los rayos luminosos a través del espacio que separa el objeto de la imagen.

I.11-Espejos

Formación de imágenes en espejos planos: conforme se deduce de las leyes de la reflexión, la imagen *P´* de un punto objeto P respecto de un espejo plano S´ estará situada al otro lado de la superficie reflectora a igual distancia de ella que el punto objeto P. Además la línea que une el punto objeto P con su imagen *P´* es perpendicular al espejo. Es decir, *P* y *P´* son simétricos respecto de *S;* si se repite este procedimiento de construcción para cualquier objeto punto por punto, se tiene la imagen simétrica del objeto respecto del plano del espejo. Dicha imagen está formada, no por los propios rayos, sino por sus prolongaciones. En casos como éste se dice que la imagen es *virtual*. Sin embargo, la reflexión en el espejo plano no invierte la posición del objeto. Se trata entonces de una imagen directa. En resumen, la *imagen formada en un espejo plano es virtual, directa y de igual tamaño que el objeto*. [57]

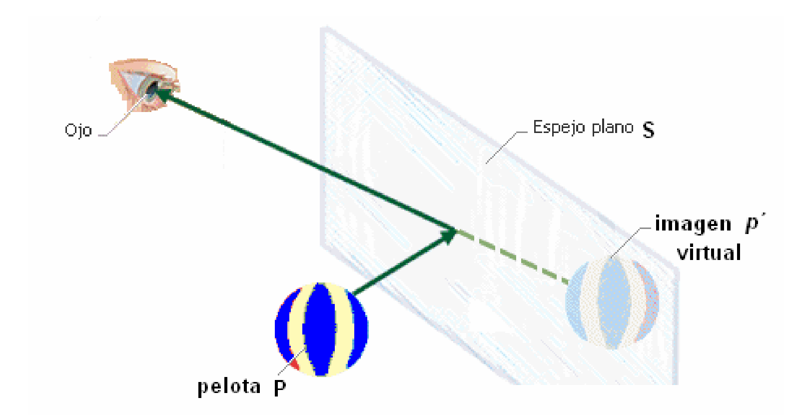


Figura.8-Reflexión en un espejo plano Los rayos de luz reflejados llegan al ojo como si procedieran directamente del objeto (en este caso, un balón) situado detrás del espejo. Éste es el motivo por el cual vemos la imagen en el espejo.

I.12-Formación de imágenes en espejos esféricos

Los espejos esféricos tienen la forma de la superficie que resulta cuando una esfera es cortada por un plano. Si la superficie reflectora está situada en la cara interior de la esfera se dice que el espejo es *cóncavo*. Si está situada en la cara exterior se denomina *convexo*. Figura 9

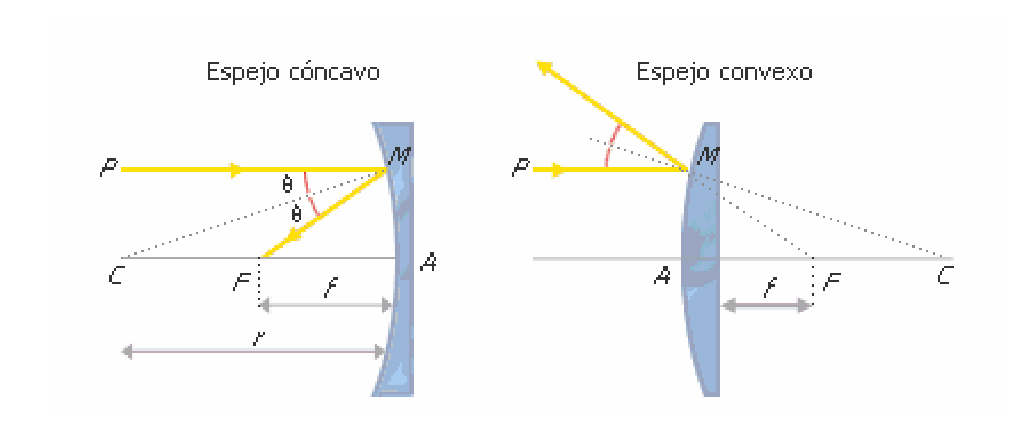


Figura 9- Espejos cóncavos y convexos

El rayo de luz ***PM*** que incide en un espejo cóncavo formando un ángulo ***θ*** con la normal es reflejado con el mismo ángulo y pasa por ***F***, el foco principal. El centro de curvatura del espejo es ***C***. Para espejos de pequeña abertura, la distancia ***CA*** (igual al radio ***r***) es el doble de ***FA*** (distancia focal ***f***). El polo o centro del espejo es ***A***. En un espejo convexo, el foco principal ***F*** es el punto del que parecen provenir, después de ser reflejados, los rayos que inciden en el espejo paralelos al eje principal. La distancia focal ***f*** tiene un valor negativo. La mayor parte de la terminología tradicional de la óptica geométrica se desarrolló en relación con superficies esféricas de reflexión y refracción. Sin embargo, a veces se consideran superficies no esféricas o asféricas. El eje óptico es una línea de referencia que constituye un eje de simetría, y pasa por el centro de una lente o espejo esféricos y por su centro de curvatura. Si un haz de rayos estrecho que se propaga en la dirección del eje óptico incide sobre la superficie esférica de un espejo o una lente delgada, los rayos se reflejan o refractan de forma que se cortan, o parecen cortarse, en un punto situado sobre el

eje óptico. La distancia entre ese punto (llamado foco) y el espejo o lente se denomina distancia focal. Cuando una lente es gruesa, los cálculos se realizan refiriéndolos a unos planos denominados planos principales, y no a la superficie real de la lente. Si las dos superficies de una lente no son iguales, ésta puede tener dos distancias focales, según cuál sea la superficie sobre la que incide la luz. Cuando un objeto está situado en el foco, los rayos que salen de él serán paralelos al eje óptico después de ser reflejados o refractados. Si una lente o espejo hace converger los rayos de forma que se corten delante de dicha lente o espejo, la imagen será real e invertida. Si los rayos divergen después de la reflexión o refracción de modo que parecen venir de un punto por el que no han pasado realmente, la imagen no está invertida y se denomina imagen virtual. La relación entre la altura de la imagen y la altura del objeto se denomina aumento lateral.

Si se consideran positivas las distancias medidas desde una lente o espejo en el sentido en que se desplaza la luz, y negativas las medidas en sentido opuesto, entonces, siendo ***u*** la distancia del objeto, ***v*** la distancia de la imagen y ***f*** la distancia focal de un espejo o una lente delgada, los espejos esféricos cumplen la ecuación

$$1/v + 1/u = 1/f$$

y las lentes esféricas la ecuación

$$1/v - 1/u = 1/f$$

Si una lente simple tiene superficies de radios r_1 y r_2 y la relación entre su índice de refracción y el del medio que la rodea es ***n**,* se cumple que

$$1/f = (n - 1)\,(1/r_1 - 1/r_2)$$

La distancia focal de un espejo esférico es igual a la mitad de su radio de curvatura. Como se indica en la figura 9, los rayos que se desplazan en un haz estrecho en la dirección del eje óptico e inciden sobre un espejo cóncavo cuyo centro de curvatura está situado en ***C,*** se reflejan de modo que se cortan en ***B,*** a media distancia entre ***A*** y ***C.*** Si la distancia del objeto es mayor que la distancia ***AC,*** la imagen es real, reducida e invertida. Si el objeto se encuentra entre el centro de curvatura y el foco, la imagen es real, aumentada e invertida. Si el objeto está situado entre la superficie del espejo y su foco, la imagen es virtual, aumentada y no invertida. Un espejo convexo sólo forma imágenes virtuales, reducidas y no invertidas, a no ser que se utilice junto con otros componentes ópticos.

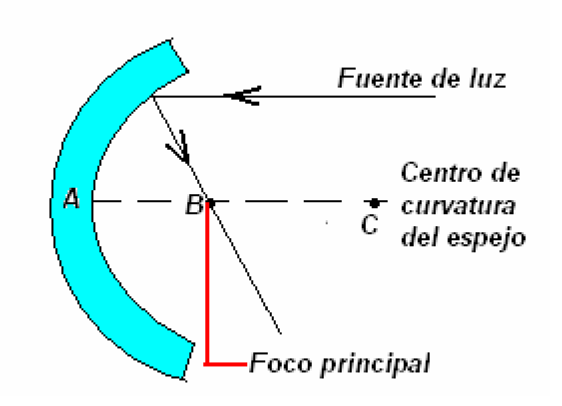


Figura.10- Reflexión de un espejo cóncavo

I.13-Láminas y prismas: La luz en las láminas.

Cuando la luz atraviesa una lámina de material transparente el rayo principal sufre dos refracciones, pues encuentra en su camino dos superficies de separación diferentes. El estudio de la marcha de los rayos cuando la lámina es de caras planas y paralelas, resulta especialmente sencillo y permite familiarizarse de forma práctica con el fenómeno de la refracción luminosa.

En una lámina de vidrio de estas características las normales N y *N´* a las superficies límites S y S´ son también paralelas, por lo que el ángulo de refracción respecto de la primera

superficie coincidirá con el de incidencia respecto de la segunda. Si además la lámina esté sumergida en un mismo medio como puede ser el aire, éste estará presente a ambos lados de la lámina, de modo que la relación entre los índices de refracción aire-vidrio para la primera refracción será inversa de la correspondiente a la segunda refracción vidrio-aire. Eso significa que, de acuerdo con la ley de Snell, el rayo refractado en la segunda superficie S´ se desviará respecto del incidente alejándose de la normal *N´* en la misma medida en que el rayo refractado en la superficie S se desvíe respecto de su incidente, en este caso acercándose a la normal.

Esta equivalencia en la magnitud de desviaciones de signo opuesto hace que el rayo que incide en la lámina y el rayo que emerge de ella sean paralelos, siempre que los medios a uno y otro lado sean idénticos. En tal circunstancia las láminas plano-paralelas no modifican la orientación de los rayos que inciden sobre ellas, tan sólo los desplazan.

I.14-El prisma óptico.

Un prisma óptico es, en esencia, un cuerpo transparente limitado por dos superficies planas no paralelas. El estudio de la marcha de los rayos en un prisma óptico es semejante al realizado para láminas paralelas, sólo que algo más complicado por el hecho de que al estar ambas caras orientadas según un ángulo, las normales correspondientes no son paralelas y el rayo emergente se desvía respecto del incidente.

El prisma óptico fue utilizado sistemáticamente por Isaac Newton en la construcción de su teoría de los colores, según la cual la luz blanca es la superposición de luz de siete colores diferentes, rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, añil y violeta. Experimentos concienzudos realizados con rayos de luz solar y prismas ópticos permitieron a Newton llegar no sólo a demostrar el carácter compuesto de la luz blanca, sino a explicar el fenómeno de la dispersión cromática óptica.

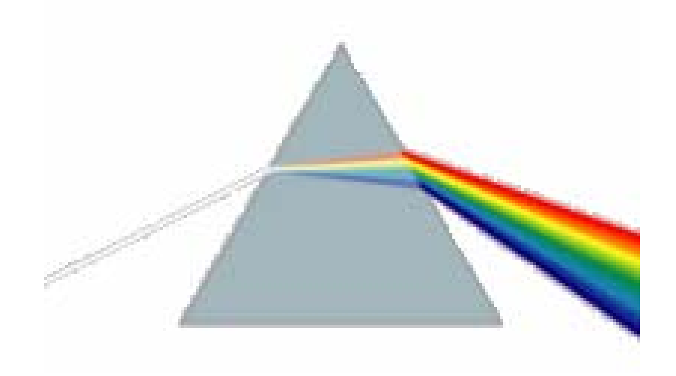


Figura. 11- Espectro de la luz blanca

Cuando la luz atraviesa un prisma —un objeto transparente con superficies planas y pulidas no paralelas— el rayo de salida ya no es paralelo al rayo incidente. Como el índice de refracción de una sustancia varía según la longitud de onda, un prisma puede separar las diferentes longitudes de onda contenidas en un haz incidente y formar un espectro. En la figura 12, el ángulo *CBD* entre la trayectoria del rayo incidente y la trayectoria del rayo emergente es el ángulo de desviación. Puede demostrarse que cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo formado por el rayo emergente, la desviación es mínima. El índice de refracción de un prisma puede calcularse midiendo el ángulo de desviación mínima y el ángulo que forman las caras del prisma.

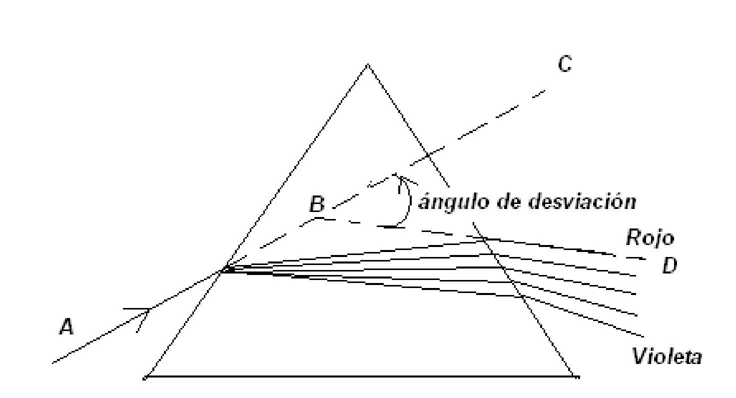


Figura.12 - Refracción de la luz de un prisma

Desde Isaac Newton, se sabe que el prisma presenta un grado de refringencia o índice de refracción distinto para cada componente de la luz blanca, por lo que cada color viaja dentro

del prisma a diferente velocidad. Ello da lugar, según la ley de Snell, a desviaciones de diferentes magnitudes de cada uno de los componentes que inciden en el prisma en forma de luz blanca y emergen de él ya descompuestos formando los llamados colores del arco iris. Estas diferentes clases de luz definen la gama conocida como *espectro visible*.

I.15-Lentes

Las lentes son objetos transparentes, limitados por dos superficies esféricas o por una superficie esférica y otra plana, que se hallan sumergidas en un medio, asimismo transparente, normalmente aire.

Tipos de lentes: De la combinación de los tres posibles tipos de superficies límites, cóncava, convexa y plana, resultan las diferentes clases de lentes. Según su geometría, las lentes pueden ser *biconvexas, plano-convexas, bicóncavas y cóncavo-convexas*.

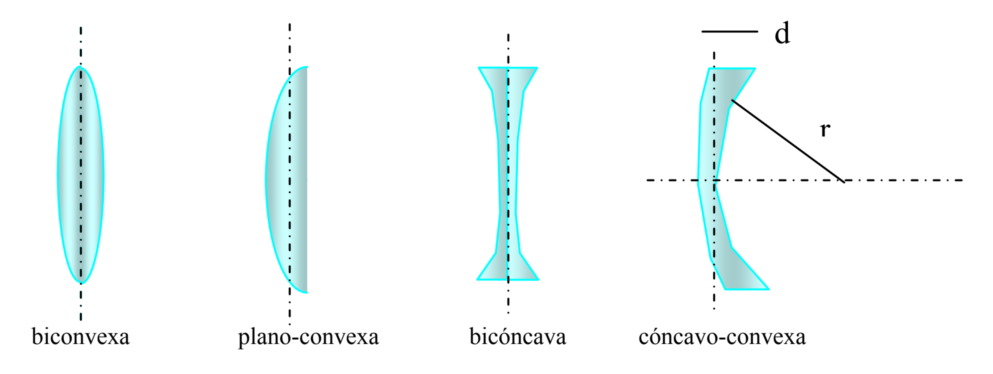


Figura.13- Tipos de lentes

Las lentes con superficies de radios de curvatura pequeños tienen distancias focales cortas. Una lente con dos superficies convexas siempre refractará los rayos paralelos al eje óptico de forma que converjan en un foco situado en el lado de la lente opuesto al objeto. Una superficie de lente cóncava desvía los rayos incidentes paralelos al eje de forma divergente; a no ser que la segunda superficie sea convexa y tenga una curvatura mayor que la primera, los rayos divergen al salir de la lente, y parecen provenir de un punto situado en el mismo

lado de la lente que el objeto. Estas lentes sólo forman imágenes virtuales, reducidas y no invertidas.

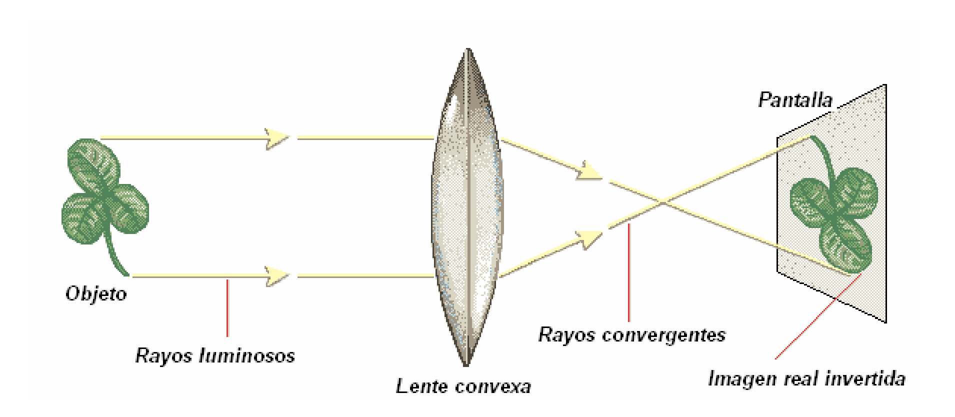


Figura.14- Lente convexa Una lente convexa es más gruesa en el centro que en los extremos. La luz que atraviesa una lente convexa se desvía hacia dentro (converge).

Si la distancia del objeto es mayor que la distancia focal, una lente convergente forma una imagen real e invertida. Si el objeto está lo bastante alejado, la imagen será más pequeña que el objeto. Si la distancia del objeto es menor que la distancia focal de la lente, la imagen será virtual, mayor que el objeto y no invertida. En ese caso, el observador estará utilizando la lente como una lupa o microscopio simple. El ángulo que forma en el ojo esta imagen virtual aumentada (es decir, su dimensión angular aparente) es mayor que el ángulo que formaría el objeto si se encontrara a la distancia normal de visión. La relación de estos dos ángulos es la potencia de aumento de la lente. Una lente con una distancia focal más corta crearía una imagen virtual que formaría un ángulo mayor, por lo que su potencia de aumento sería mayor. La potencia de aumento de un sistema óptico indica cuánto parece acercar el objeto al ojo, y es diferente del aumento lateral de una cámara o telescopio, por ejemplo, donde la relación entre las dimensiones reales de la imagen real y las del objeto aumenta según aumenta la distancia focal.

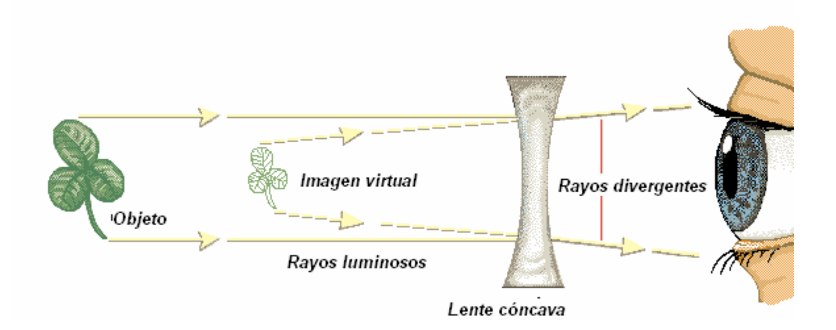


Figura. 15- Lente cóncava. Las lentes cóncavas están curvadas hacia dentro. La luz que atraviesa una lente cóncava se desvía hacia fuera (diverge)

La cantidad de luz que puede admitir una lente aumenta con su diámetro. Como la superficie que ocupa una imagen es proporcional al cuadrado de la distancia focal de la lente, la intensidad luminosa de la superficie de la imagen es directamente proporcional al diámetro de la lente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia focal. Por ejemplo, la imagen producida por una lente de 3 cm de diámetro y una distancia focal de 20 cm sería cuatro veces menos luminosa que la formada por una lente del mismo diámetro con una distancia focal de 10 cm. La relación entre la distancia focal y el diámetro efectivo de una lente es su relación focal, llamada también número ***f***. Su inversa se conoce como abertura relativa. Dos lentes con la misma abertura relativa tienen la misma luminosidad, independientemente de sus diámetros y distancias focales.

I.16-Aberración

La óptica geométrica predice que la imagen de un punto formada por elementos ópticos esféricos no es un punto perfecto, sino una pequeña mancha. Las partes exteriores de una superficie esférica tienen una distancia focal distinta a la de la zona central, y este defecto hace que la imagen de un punto sea un pequeño círculo. La diferencia en distancia focal entre las distintas partes de la sección esférica se denomina aberración esférica.

Si la superficie de una lente o espejo, en lugar de ser una parte de una esfera es una sección de un **paraboloide* de revolución, los rayos paralelos que inciden en cualquier zona de la superficie se concentran en un único punto, sin aberración esférica. Mediante combinaciones de lentes convexas y cóncavas puede corregirse la aberración esférica, pero este defecto no puede eliminarse con una única lente esférica para un objeto e imagen reales. El fenómeno que consiste en un aumento lateral distinto para los puntos del objeto no situados en el eje óptico se denomina coma. Cuando hay coma, la luz procedente de un punto forma una familia de círculos situados dentro de un cono, y en un plano perpendicular al eje óptico la imagen adquiere forma de gota. Escogiendo adecuadamente las superficies puede eliminarse la coma para un determinado par de puntos objeto-imagen, pero no para todos los puntos. Los puntos del objeto y la imagen correspondientes entre sí (o conjugados) para los que no existe aberración esférica ni coma se denominan puntos aplanáticos, y una lente para la que existe dicho par de puntos se denomina lente aplanática.

El astigmatismo es un defecto por el que la luz procedente de un punto del objeto situado fuera del eje se esparce en la dirección del eje óptico. Si el objeto es una línea vertical, la sección transversal del haz refractado es una elipse; a medida que se aleja uno de la lente, la elipse se transforma primero en una línea horizontal, luego vuelve a expandirse y posteriormente pasa a ser una línea vertical. Si en un objeto plano, la superficie de mejor enfoque está curvada, se habla de curvatura de imagen. La 'distorsión' se debe a una variación del aumento con la distancia axial, y no a una falta de nitidez de la imagen. Como el índice de refracción varía con la longitud de onda, la distancia focal de una lente también varía, y produce una 'aberración cromática' axial o longitudinal.

**La parábola se puede definir como el lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de un punto fijo llamado foco, y de una recta fija llamada directriz.*

Cada longitud de onda forma una imagen de tamaño ligeramente diferente; esto produce lo que se conoce por aberración cromática lateral. Mediante combinaciones (denominadas acromáticas) de lentes convergentes y divergentes fabricadas con vidrios de distinta dispersión es posible minimizar la aberración cromática. Los espejos están libres de este defecto. En general, en las lentes acromáticas se corrige la aberración cromática para dos o tres colores determinados. [58]

I.17-Polarización de la Luz

La luz ordinaria es *no polarizada*, tanto si es natural como artificial. Significa esto que si, colocados de frente a la fuente de luz, fuéramos capaces de medir el vector intensidad de campo eléctrico a lo largo de una dirección determinada, obtendríamos algo similar a lo representado en la figura: cualquiera que sea la dirección del espacio que se escoja para medir, se obtendría el mismo valor.

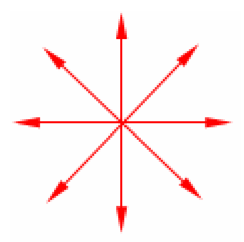


Figura.16- Luz no polarizada

Dicho de otra forma, la componente del vector intensidad de campo tiene el mismo valor en todas las direcciones.

Por el contrario, si se logra obtener luz donde el vector intensidad de campo vibre siempre en una sola dirección, decimos que la luz está *polarizada en un plano*.

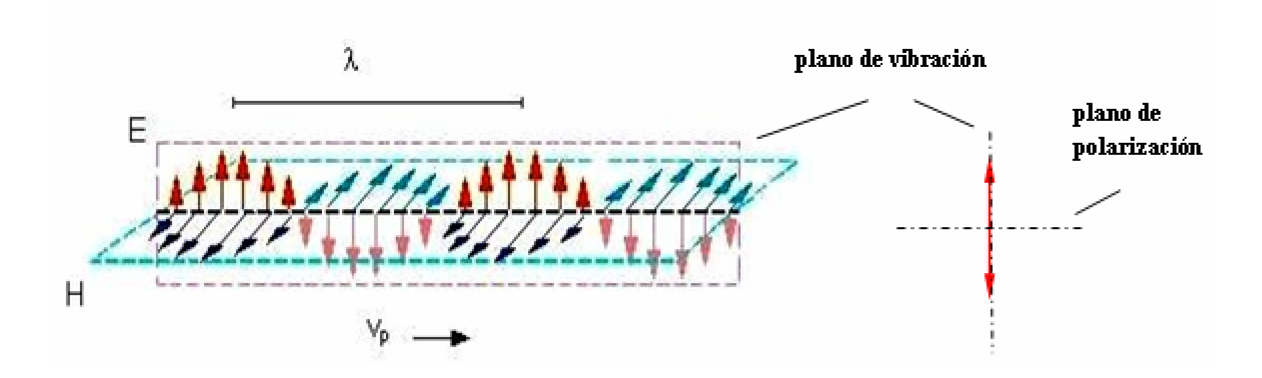


Figura.17- Luz polarizada en un plano

II- Física de la visión

Los ojos son los órganos que nos permiten *ver* todo lo que nos rodea. Reciben la luz que reflejan los objetos y envían estímulos al cerebro, que los interpreta y los asimila junto con los que recibe de los demás sentidos de la percepción. El 50 % de la información que recibimos de nuestro entorno la recibimos a través de los ojos. La ingente información que recibimos en un simple vistazo a nuestro entorno se guarda durante un segundo en nuestra memoria y luego la desechamos casi toda. ¡No nos fijamos en casi nada!

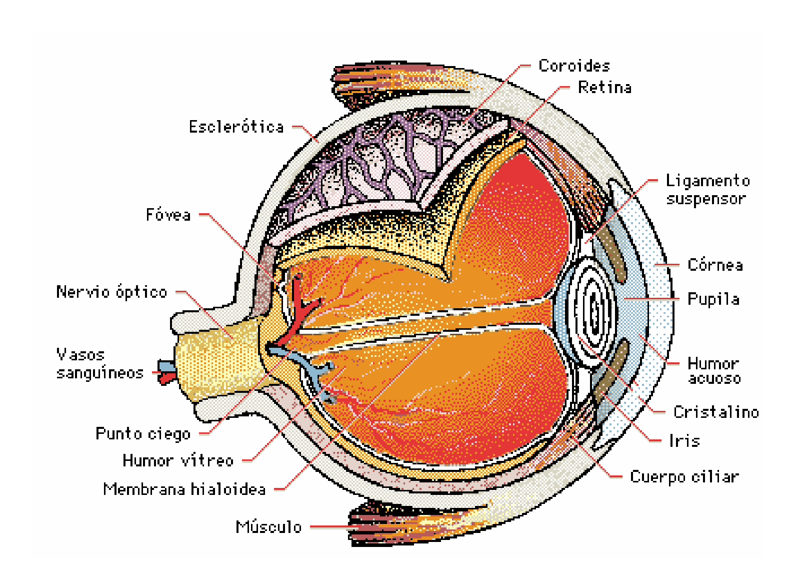


Figura 18-Estructura del ojo humano

Como puede verse el ojo es casi una esfera de unos 20mm de diámetro, formada por un conjunto de membranas denominadas córnea, esclera, coroides y retina. La cornea y la

esclera constituyen las envolturas externas anterior y posterior del ojo respectivamente. La capa coroidal además de alimentar el ojo a través de sus vasos sanguíneos, tiene la misión de absorber la luces extrañas que entran el ojo así como de amortiguar el efecto de dispersión de la luz dentro del globo ocular. El iris o diafragma esta situado en la parte anterior del coroides, y tiene como misión controlar la cantidad de luz que entra en el ojo. [59]

Para ello, la pupila o parte central del iris puede cambiar de tamaño en función de la luminosidad incidente desde 2mm a 8mm de diámetro. La lente del ojo esta formada por capas concéntricas de células fibrosas y esta sujeta al coroides a través de fibras.

La lente esta compuesta principalmente por agua (60%-70%), grasa 6% y proteínas. En la lente se absorbe cerca de un 8% del espectro de luz visible así como una gran proporción de luz infrarroja y ultravioleta. La cantidad de luz que penetra en el ojo es regulada por el iris que se comporta como un esfínter, contrayendo y dilatando la pupila de acuerdo con la cantidad de luz que incide sobre el ojo. La visión normal depende de la capacidad del ojo para refractar la luz.

Cuando la luz llega al ojo, la imagen que transporta se forma en la retina por la sensibilización de dos clases de receptores: los bastones y los conos. El número de conos existentes en un ojo esta entre 6-7 millones y su situación dentro del ojo se concentra alrededor de un punto llamado *fóvea*. La misión de los conos dentro del ojo es doble. Por un lado son responsables de la detección del color y por otro ayudan a resolver los detalles finos de la imagen. Cuando una persona quiere resolver detalles finos en una imagen intenta que esta se forme en su retina alrededor de la fóvea, consiguiendo por tanto, que los conos sean mayoritariamente los receptores de la luz.

La visión a través de los conos se denomina *visión fotocópica* o de luz brillante. El hecho de que la imagen sea invertida está compensado por mecanismos cerebrales que hacen que cualquier imagen sea vista correctamente [60].

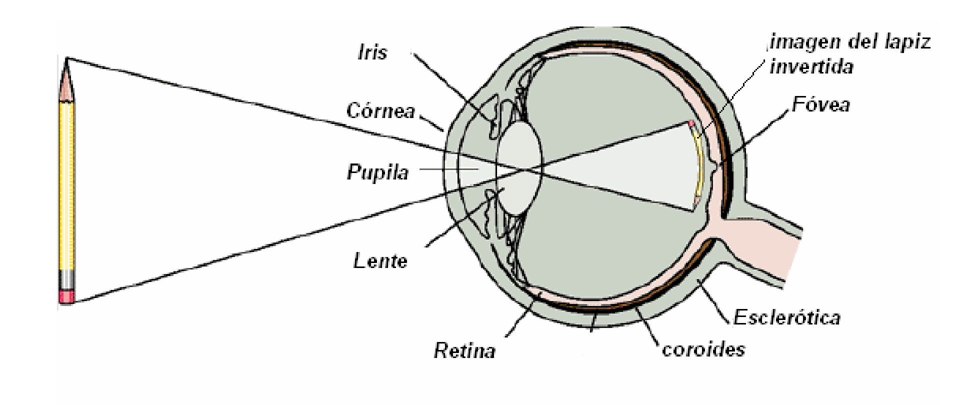


Figura 19- Paso de la luz por la lente del ojo y formación de la imagen en la fóvea

El funcionamiento del ojo está basado en la presencia de lentes; sencillos instrumentos cuya combinación constituye la parte fundamental de los telescopios, microscopios y otros sistemas ópticos que han abierto a la ciencia y al hombre las fronteras del mundo de lo grande y lo pequeño. Un importante factor para la buena percepción de las imágenes es la acomodación, mecanismo por el cual el cristalino puede variar su curvatura. El sistema óptico que constituye el órgano de la visión puede equipararse en términos físicos a una lente convergente que proyecta las imágenes exteriores sobre la retina, la membrana más interna de las que constituyen el globo ocular, sin ninguna actuación de los músculos ciliares.

En este contexto, la correcta focalización de una imagen depende del poder de refracción del cristalino, cuerpo transparente bicóncavo que hace las veces de lente en el ojo. Tal magnitud se ve condicionada a su vez por la capacidad de curvatura de ese órgano, la que se conoce como *acomodación* ocular. Esta facultad permite fijar y enfocar sobre la retina imágenes situadas a menos de seis metros; al ojo que presenta tal condición se le designa como normal o *emétrope*.

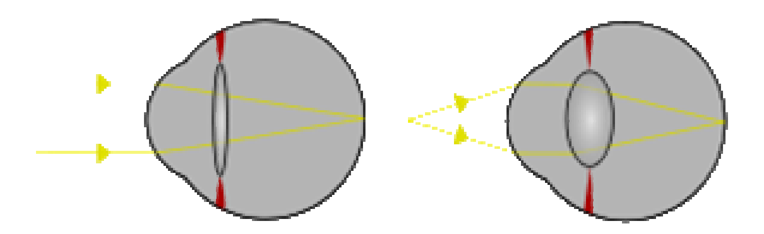


Figura 20-Acomodación para el enfoque de la luz de un objeto distante y la luz de un objeto cercano.

El ser humano es capaz de enfocar los dos ojos sobre un objeto, lo que le permite una visión *estereoscópica*, fundamental para percibir la profundidad. El principio de la visión estereoscópica puede describirse como un proceso visual, el cual muestra una imagen desde dos ángulos ligeramente diferentes, que los ojos funden en una imagen tridimensional única. La percepción del color combina elementos físicos y fisiológicos. La luz que incide sobre la retina genera en sus células reacciones fotoquímicas que se transmiten al cerebro por el nervio óptico en forma de impulsos nerviosos. Las células responsables de la visión del color son los conos, que inhiben su acción en condiciones de débil luminosidad (por ejemplo, de noche). [61]

Por otra parte, la sensación de los distintos tonos del espectro cromático se obtiene por combinación de los tres colores básicos a los que son sensibles los conos: rojo, verde y azul.

Atendiendo a lo expuesto hasta aquí y teniendo en cuenta los principales fenómenos de la óptica geométrica podemos establecer que cuando la luz atraviesa las fronteras de separación entre dos medios experimenta fenómenos de reflexión y refracción.

En virtud de tales fenómenos, cualquier observador percibe los objetos que emiten o reflejan la luz condicionado por las propiedades del medio en que se encuentra.

II.1-Dioptría

Es la unidad de potencia óptica de una lente o de un sistema óptico cualquiera. Equivale al inverso de la distancia focal, expresada en metros, de una lente convergente o divergente. Se llama potencia de una lente a la inversa de la distancia focal. Por ejemplo, una lente de distancia focal 1 m tiene una potencia de 1 dioptría y una lente de distancia focal 0,5 m tiene una potencia de 2 dioptrías. La potencia de una lente convexa es positiva y la potencia de una lente cóncava es negativa.

Las superficies de separación entre dos medios reciben el nombre de *dioptrios*. En el *dioptrio plano* es fácil señalar los componentes elementales de un sistema óptico:

- *Eje óptico*, horizontal y perpendicular al plano de refracción del dioptrio. El origen del sistema se sitúa en la intersección del eje óptico con la superficie de separación.
- *Espacio objeto,* en el que se encuentra el objeto o fuente de luz, y *espacio imagen*, donde se proyecta la imagen.
- Punto objeto**,** cualquier punto perteneciente a un objeto en el espacio objeto y *punto imagen*, que corresponde a la imagen formada de un punto objeto en el espacio imagen.
- *Imagen real*, que se forma por la convergencia de dos rayos refractados, e *imagen virtual,* que resulta de la prolongación de los rayos refractados cuando son divergente

Cuando varios rayos refractados de un punto objeto no confluyen en el mismo punto imagen, el sistema provoca una *aberración óptica.*

Siempre ha sido estudiada la formación de las imágenes a través de las lentes aisladas; ahora vamos a considerar la misma situación y las leyes que rigen, cuando son varios los dióptrios que se combinan. Este es el caso del ojo, el cual posee por lo menos 6 superficies de discontinuidad óptica (2 para la córnea y 4 para el cristalino) [62].

Las constantes ópticas del ojo (radios de curvatura, distancias respectivas e índices de refracción) varían de un individuo a otro.

Para el estudio óptico del ojo y, como modelo, se ha elegido el llamado ojo teórico, que se caracteriza porque sus constantes ópticas son la medida de un gran número de ojos normales o emétropes.

Teniendo en cuenta que el ojo teórico es en realidad un esquema simplificado del ojo creemos que puede ser denominado también Ojo Esquemático; por lo que emplearemos ambos términos indistintamente.

El ojo teórico es un ojo ficticio cuya retina se encuentra situada exactamente en el plano focal imagen y por tanto de refracción emétrope.

En él todo rayo que llega a la córnea paralelo al eje principal (proveniente de un objeto situado en el infinito) se refracta pasando por el foco imagen, es decir, el punto de intersección entre el eje principal y la retina.

Dado que un ojo anatómica y ópticamente normal es aquel que tiene una correcta relación entre el largo axial, los índices de refracción y las curvaturas de los medios refractivos, podemos imaginar la posibilidad de efectuar innumerables combinaciones de ojos teóricos con la sola variación de una de las constantes ópticas.

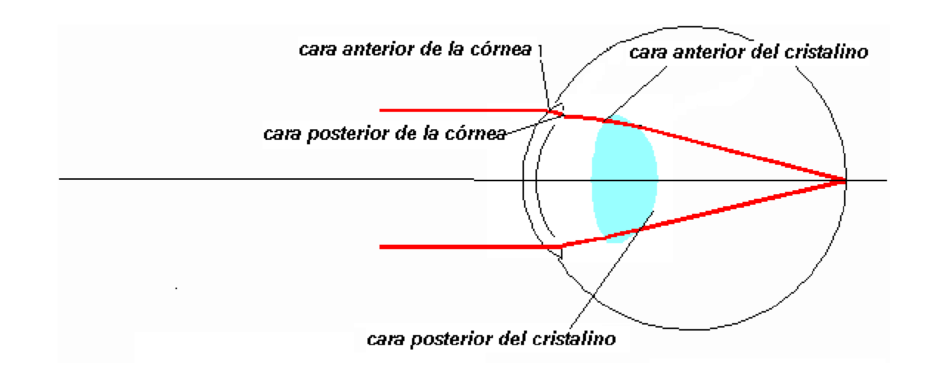


Figura 21-Caras de los medios refractivos córnea y cristalino

Una de ellas que cotidiana, involuntaria e imperceptiblemente variamos es la de los radios de curvatura del cristalino para lograr una modificación del poder dióptrico del mismo; conociéndose dicha facultad con el nombre de Acomodación.Como ejemplo de herramienta de estudio de éste ojo veremos dos de las ametropías más comunes: Miopía e Hipermetropía, y los criterios de corrección aplicados a éste esquema mediante la utilización de distintos tipos de lentes y atendiendo a las leyes de la óptica geométrica.

II.2-Miopía

Condición en la cual todos los rayos que provienen de un objeto ubicado en el infinito, luego de refractarse se cortan antes de llegar al plano focal imagen (retina), por lo tanto la imagen será borrosa; con la acomodación en reposo.

Punto Remoto (P.R.) Es el punto más alejado en que puede situarse un objeto para que pueda ser visto nítidamente sin uso de la acomodación. El P.R. de una persona emétrope se encuentra a 6 m. y equivale al infinito óptico.

En el caso de miopía el P.R. se ubica a una distancia finita situada entre los 6 m y el ojo.

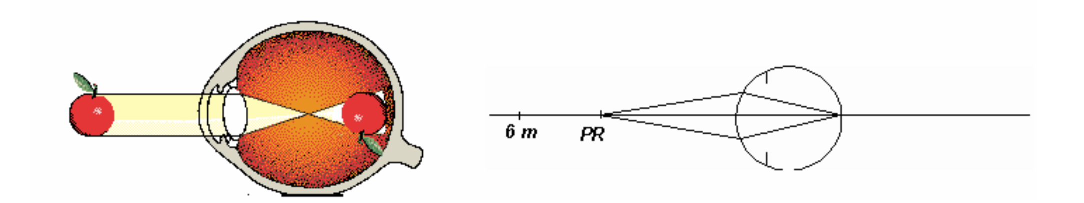


Figura 22- Enfoque miope.

Criterio de Corrección: Este se basa en la localización del P.R. dado que la focal F de la lente bicóncava correctora debe coincidir con él; equivale decir que el poder dióptrico de la misma es igual a la inversa del P.R.

Por ejemplo, suponiendo que éste ojo miope tenga su P.R. a 0,50 m., el valor de la lente correctora será: 1/ 0,50 m. = 2 diop.

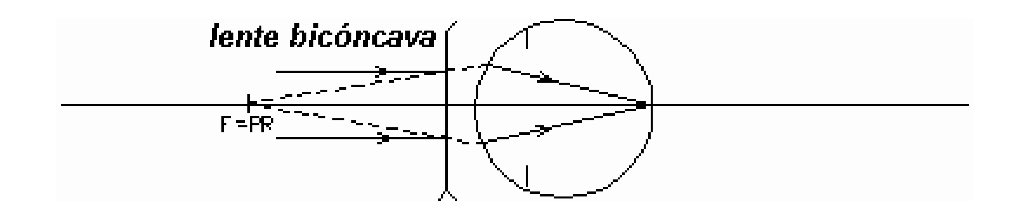


Figura 23- Ejemplo de corrección de la miopía

II.3-Hipermetropía

Condición en la cual los rayos provenientes de un objeto ubicado en el infinito, luego de refractarse se cortan por detrás de la retina, con la acomodación relajada.

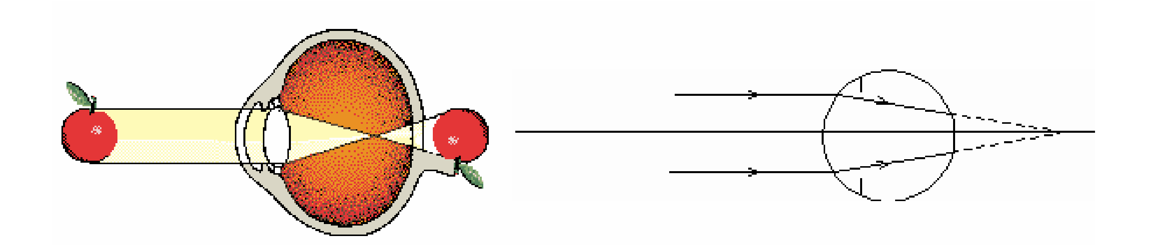


Figura 24- Enfoque hipermétrope

En el caso de la Hipermetropía el P.R. se ubica a una distancia situada por detrás del plano focal imagen (retina), sobre el eje óptico.

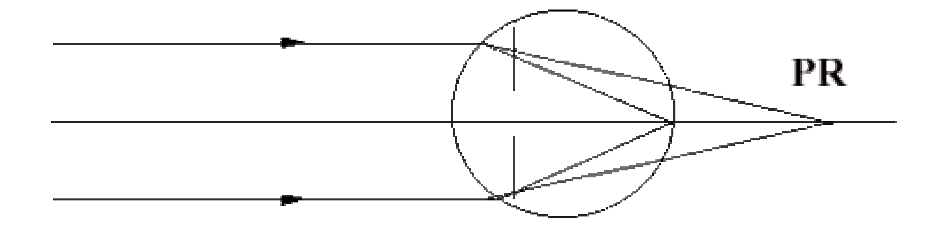


Figura .25- Situación del PR en la hipermetropía.

Por ejemplo, suponiendo que éste ojo hipermétrope tenga su P.R. a 0,50 m. por detrás de la retina, el valor de la lente convexa correctora será: 1 / 0,50 m.= 2 diop.

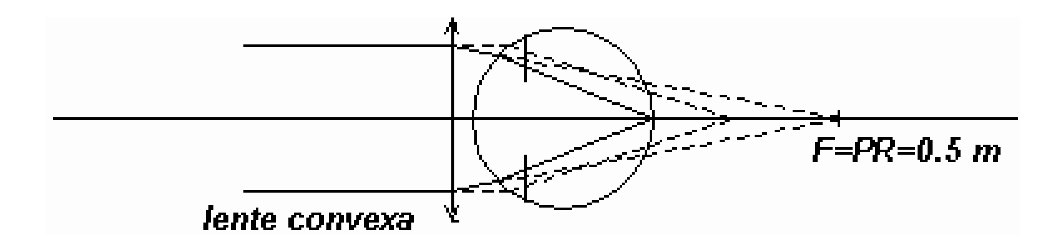


Figura 26- Ejemplo de corrección de visión hipermétrope

II.4-Ecuación del Fabricante de Lentes

La siguiente expresión relaciona la distancia focal de una lente con el índice de refracción del material con que está hecha y los radios de curvatura de sus superficies. Se conoce como *la ecuación del fabricante de lentes*.

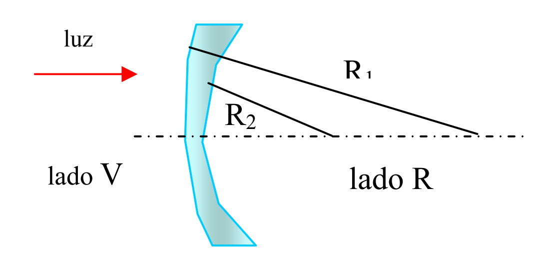


Figura 27

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

En esta expresión,

- n: índice de refracción
- f: distancia focal
- R_1 : radio de curvatura de la superficie de la lente *más cercana al origen de luz*

- R_1 y R_2 son (+) si el centro de curvatura está en el lado R, y (-) si está en el lado V.
- En el ejemplo que se muestra, R_1 y R_2 son positivos. Además $R_1 > R_2$. Por tanto,

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} < 0$$

Y, según la ecuación del fabricante, $f < 0$. Significa que la lente del ejemplo es una lente *divergente*.

II.5-Sensibilidad Espectral

El ojo humano no posee la misma sensibilidad para todas las frecuencias de la radiación electromagnética visible. Tiene un máximo para el verde de longitud de onda 555 nm.

En la figura se muestra la *curva de sensibilidad espectral* del ojo humano. El *coeficiente de visibilidad* $\mathbf{V_\lambda}$ se define por la expresión

$$V_\lambda = \frac{W_m}{W_\lambda} \cdot 100$$

donde:

$\mathbf{W_\lambda}$: potencia emitida por una fuente monocromática de longitud de onda λ**.**

$\mathbf{W_m}$**:** potencia emitida por una fuente con λ = 555 nm *que produce en el ojo la misma sensación de brillantez.*

El coeficiente de visibilidad es una magnitud subjetiva, pues depende directamente de las sensaciones psicofisiológicas del observador. Algunas personas poseen un rango de visión más amplio que otras. Por esta razón la curva se calcula no para una, sino para muchas personas, y se toma un promedio estadístico. Las curvas que usualmente se

reportan en los textos son el resultado de este procedimiento, llevado a convenios internacionales.

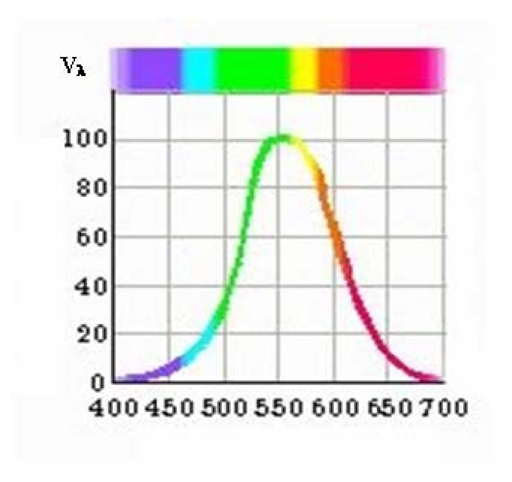


Figura 28- Curva de sensibilidad espectral del ojo humano.

La curva de sensibilidad del ojo humano difiere bastante de la de muchos animales. Por ejemplo, las abejas no distinguen la luz roja, pero son capaces de ver el ultravioleta, mientras que los pájaros son más sensibles a la luz roja.

El ojo es un instrumento muy sensible. Se ha señalado que el ojo humano en condiciones óptimas es capaz de detectar, en una noche oscura y sin estrellas, la luz de una vela a 100 km de distancia.

CAPÍTULO IV

Sonido en la medicina

I- Física del sonido

I.I- Conceptos físicos fundamentales del sonido.

I.I.1- Ondas

Las ondas (o movimientos ondulatorios) son, fundamentalmente, de dos clases: *mecánicas y electromagnéticas.* Las ondas mecánicas necesitan un medio material para propasarse; las electromagnéticas no, pues se propagan también por el vacío.

Las ondas pueden ser caracterizadas de la siguiente manera:

a) periódicas, cuando proceden de una fuente que vibra periódicamente y transmite frentes de ondas en sucesivas perturbaciones;

b) no periódicas, cuando son perturbaciones o frentes de onda aislados;

c) longitudinales, si el desplazamiento de las partículas del medio es paralelo a la dirección de traslación de la energía (como el sonido);

d) transversales, si la onda va asociada a desplazamientos perpendiculares a la dirección de propagación de la energía (como las ondas electromagnéticas);

e) progresivas o viajeras, transportan energía y cantidad de movimiento desde el origen a otros puntos del *entorno.*

f) estacionarias, no transmiten energía pero si intercambian energías cinética y potencial en sus elongaciones.

I.I.2-Velocidad del sonido*:*

Es la velocidad de propagación de las ondas mecánicas longitudinales, producidas por variaciones de presión del medio. Estas variaciones de presión generan en el cerebro la sensación del sonido. La velocidad de propagación de la onda sonora depende de las características del medio en el que se realiza dicha propagación y no de las características de la onda o de la fuerza que la genera.

Aparte del interés del estudio del propio sonido, su propagación en un medio puede servir para estudiar algunas propiedades de dicho medio de transmisión. Aunque la velocidad del sonido no depende del tono (frecuencia) ni de la longitud de onda de la onda sonora, sí es importante su atenuación. Este fenómeno se expresa por ley cuadrática inversa, que explica que cada vez que se aumenta al doble la distancia de la fuente sonora, la intensidad sonora disminuye.

La velocidad del sonido varía dependiendo del medio a través del cual viajen las ondas sonoras. En todo tipo de ondas mecánicas el medio juega un papel esencial en la propagación de la perturbación, hasta el punto de que en ausencia de medio material, la vibración, al no tener por donde propasarse, no da lugar a la formación de la onda correspondiente. La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio. En el caso de medios gaseosos, como el aire, las vibraciones son transmitidas de un punto a otro a través de choques entre las partículas que constituyen el gas, de ahí que cuanto mayor sea la densidad de éste, mayor será la velocidad de la onda sonora correspondiente. En los medios sólidos son las fuerzas que unen entre sí las partículas constitutivas del cuerpo las que se encargan de propagar la perturbación de un punto a otro.

Este procedimiento más directo explica que la velocidad del sonido sea mayor en los sólidos que en los gases. Uno de los factores que puede variar la velocidad del sonido, a manera de ejemplo, es la temperatura del medio. Esto se debe a que un aumento de la temperatura se traduce en que aumenta la frecuencia con que se producen las interacciones entre las partículas que transportan la vibración y este aumento de actividad hace que aumente la velocidad.

En general, la velocidad del sonido es mayor en los sólidos que en los líquidos y, en los líquidos, mayor que en los gases.

SUSTANCIA	VELOCIDAD DEL SONIDO (m/s)
Aire (0 ºC)	331,6
Aire (20 ºC)	344
Hidrógeno (0 ºC)	1.280
Agua (0 ºC)	1.390
Agua (20 ºC)	1.484
Cobre (20 ºC)	3.580
Acero (20 ºC)	5.050
Vidrio (20 ºC)	5.200

Tabla 1- En la tabla se muestra la velocidad de propagación del sonido en distintos medios a una temperatura determinada.

I.I.2.a-Velocidad del sonido en el aire.

Las propiedades físicas del aire, su presión, temperatura y humedad, son factores que afectan la velocidad. Por ejemplo, cuanto mayor es la temperatura del aire mayor es la velocidad de propagación. La velocidad del sonido en el aire aumenta 0,6 m/s por cada 1º C de aumento en la temperatura.

Una velocidad aproximada (en metros/segundo) puede ser calculada mediante la siguiente fórmula empírica:

$$c = (331{,}5 + 0{,}6 \cdot \vartheta)\ \mathrm{m/s}$$

donde ϑ es la temperatura en grados celsius (-273 kelvins);

$$\vartheta = T - 273{,}15\,\mathrm{K}.$$

Una ecuación más exacta, referida normalmente como velocidad **adiabática* del sonido, viene dada por la fórmula siguiente:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{m}}$$

donde

- *R* es la constante de los gases,
- *m* es el peso molecular promedio del aire (R/m = 287 J/kg K] para el aire),
- κ es la razón de los calores específicos ($\kappa = c_p/c_v$ siendo igual a 1,4 para el aire)
- *T* es la temperatura absoluta en Kelvin.

En una atmósfera estándar se considera que *T* es 293,15 K, dando un valor de 343 m/s ó 1.235 kilómetros/hora.

Esta fórmula supone que la transmisión del sonido se realiza sin pérdidas de energía en el medio, aproximación muy cercana a la realidad [63].

**Proceso adiabático, en termodinámica, es cualquier proceso físico en el que magnitudes como la presión o el volumen se modifican sin una transferencia significativa de energía calorífica hacia el entorno o desde éste.*

I.I.2.b-Velocidad de sonido en los sólidos.

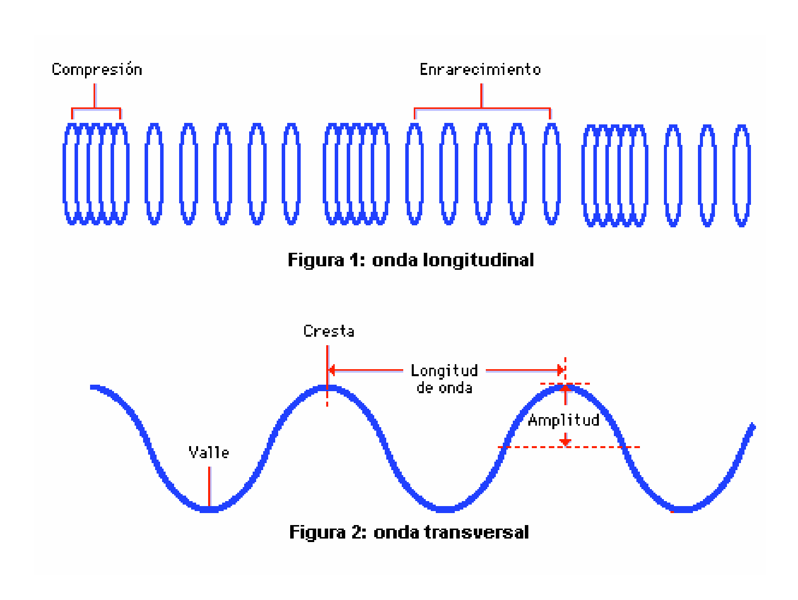
En sólidos la velocidad del sonido está dada por:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

donde ***E*** es el **Módulo de Young* y **ρ** es la densidad. De esta manera se puede calcular la velocidad del sonido para el acero que es aproximadamente de 5.146 m/s.

I.I.2.c-Velocidad de sonido en el agua.

La velocidad del sonido en el agua es de interés para realizar mapas del fondo del océano. En agua salada, el sonido viaja a aproximadamente 1.500 m/s y en agua dulce a 1.435 m/s. Estas velocidades varían debido a la presión, profundidad, temperatura, salinidad y otros factores [64]. Las ondas se llaman transversales cuando el movimiento oscilatorio se lleva a cabo en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda (figura 1), mientras que se llaman ondas longitudinales si la oscilación se realiza en la dirección de propagación (figura 2)



Thomas Young (1773 -1829), físico, médico y egiptólogo británico. Realizó estudios de materiales proponiendo una medida de la rigidez de diferentes materiales conocida en la actualidad como módulo de Young.

Un ejemplo de ondas transversales son las olas de agua, la oscilación de un corcho en la superficie del agua es de arriba a abajo mientras la onda pasa de atrás hacia adelante; un ejemplo de onda longitudinal son las ondas de compresión que pueden propagarse a lo largo de un resorte y las ondas sonoras que pueden propagarse a lo largo de un tubo de aire.

En este capítulo nos estaremos refiriendo en particular a las ondas mecánicas. Una onda sonora es una perturbación que se lleva a cabo en un gas, líquido o sólido (en el vacío no existe el sonido) y que viaja alejándose de la fuente que la genera con una velocidad definida que depende del medio en el que está viajando. Las vibraciones provocan incrementos locales de presión respecto a la presión atmosférica llamados compresiones, y decrementos locales llamados rarefacciones; los cambios de presión ocurren en la misma dirección en la que viaja la onda; pueden asumirse como cambios de densidad y como el desplazamiento de los átomos y moléculas de sus posiciones de equilibrio [65].

Los conceptos generales sobre ondas sirven para describir el sonido, pero, inversamente, los fenómenos sonoros permiten comprender mejor algunas de las características del comportamiento ondulatorio. Las ondas que se propagan a lo largo de un muelle como consecuencia de una compresión longitudinal del mismo constituyen un modelo de ondas mecánicas que se asemeja bastante a la forma en la que el sonido se genera y se propaga. La campana de un timbre vibra al ser golpeada por su correspondiente martillo, lo que da lugar a compresiones sucesivas del medio que la rodea, las cuales se propagan en forma de ondas. Un diapasón, la cuerda de una guitarra o la de un violín producen sonido según un mecanismo análogo.

I.I.3- *Fenómenos ondulatorios*.

Las propiedades de las ondas se manifiestan a través de una serie de fenómenos que constituyen lo esencial del comportamiento ondulatorio.

Así, las ondas rebotan ante una barrera, cambian de dirección cuando pasan de un medio a otro, suman sus efectos de una forma muy especial y pueden salvar obstáculos o bordear las esquinas.

El estudio de los fenómenos ondulatorios supone la utilización de conceptos tales como periodo, frecuencia, longitud de onda y amplitud, y junto a ellos el de frente de onda, el cual es característico de las ondas bidimensionales y tridimensionales. Se denomina frente de ondas al lugar geométrico de los puntos del medio que son alcanzados en un mismo instante por la perturbación.

Las ondas que se producen en la superficie de un lago, como consecuencia de una vibración producida en uno de sus puntos, poseen frentes de onda circulares. Cada uno de esos frentes se corresponden con un conjunto de puntos del medio que están en el mismo estado de vibración, es decir a igual altura. Debido a que las propiedades del medio, tales como densidad o elasticidad, son las mismas en todas las direcciones, la perturbación avanza desde el foco a igual velocidad a lo largo de cada una de ellas, lo que explica la forma circular y, por tanto, equidistante del foco, de esa línea que contiene a los puntos que se encuentran en el mismo estado de vibración. Las ondas tridimensionales, como las producidas por un globo esférico que se infla y desinfla alternativamente, poseen frentes de ondas esféricos si el foco es puntual y si el medio, como en el caso anterior, es homogéneo[66].

I.I.4-Reflexión de las ondas.

Cuando una onda alcanza la superficie de separación de dos medios de distinta naturaleza se producen, en general, dos nuevas ondas, una que retrocede hacia el medio de partida y otra que atraviesa la superficie límite y se propaga en el segundo medio. El primer fenómeno se denomina reflexión y el segundo recibe el nombre de refracción.

En las ondas monodimensionales como las producidas por la compresión de un muelle, la reflexión lleva consigo una inversión del sentido del movimiento ondulatorio. En las ondas bidimensionales o tridimensionales la inversión total se produce únicamente cuando la incidencia es normal, es decir, cuando la dirección en la que avanza la perturbación es perpendicular a la superficie reflectante. Si la incidencia es oblicua se produce una especie de rebote, de modo que el movimiento ondulatorio reflejado cambia de dirección, pero conservando el valor del ángulo que forma con la superficie límite.

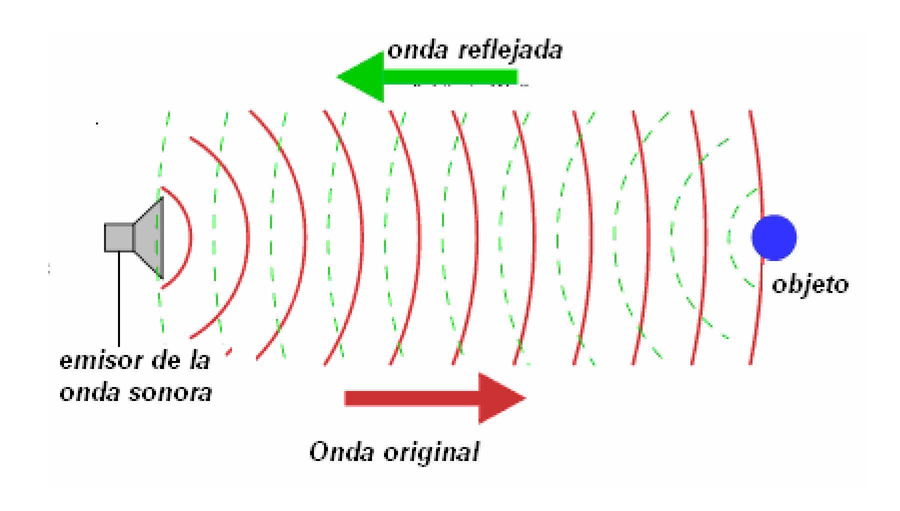


Figura 3- Fenómeno de reflexión

El tamaño del obstáculo y la longitud de onda determinan si una onda rodea el obstáculo o se refleja en la dirección de la que provenía.

Si el obstáculo es pequeño en relación con la longitud de onda, el sonido lo rodeara (difracción), en cambio, si sucede lo contrario, el sonido se refleja (reflexión) [67].

Si la onda se refleja, el ángulo de la onda reflejada es igual al ángulo de la onda incidente, de modo que si una onda sonora incide perpendicularmente sobre la superficie reflejante, vuelve sobre sí misma.

La reflexión no actúa igual sobre las altas frecuencias que sobre las bajas. Lo que se debe a que la longitud de onda de las bajas frecuencias es muy grande (pueden alcanzar los 18 metros), por lo que son capaces de rodear la mayoría de obstáculos.

En acústica esta propiedad de las ondas es sobradamente conocida y aprovechada. No sólo para aislar, sino también para dirigir el sonido hacia el auditorio mediante placas reflectoras (reflectores y tornavoces).

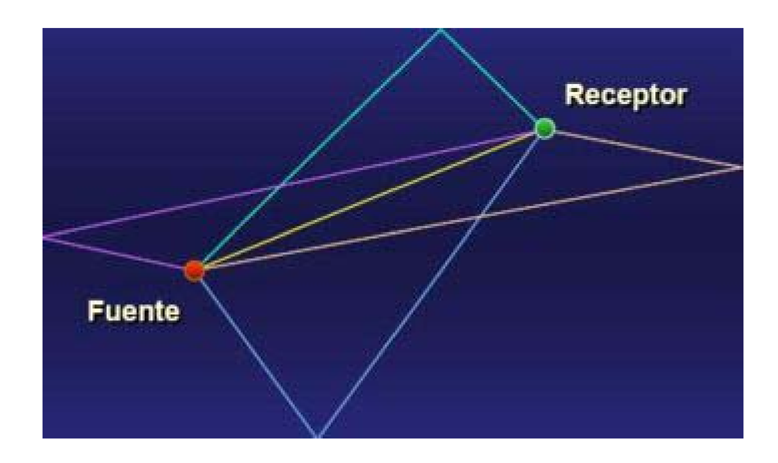


Figura 4- La línea amarilla es el sonido directo, las otras líneas son algunas de las primeras reflexiones.

I.I.5- Fenómenos relacionados con la reflexión

I.I.5.a-Ondas estacionarias.

Una onda estacionaria se produce por la suma de una onda y su onda reflejada sobre un mismo eje. Dependiendo como coincidan las fases de la onda incidente y de la reflejada, se producirá modificaciones del sonido (aumenta la amplitud o disminuye), por lo que el

sonido resultante puede resultar desagradable. En determinadas circunstancias, la onda estacionaria puede hacer que la sala entre en resonancia [68].

I.I.5.b-Eco.

La señal acústica original se ha extinguido, pero aún nos es devuelto sonido en forma de onda reflejada. El eco se explica porque la onda reflejada nos llega en un tiempo superior al de la persistencia acústica.

I.I.5.c-Reverberación.

Se produce reverberación cuando las ondas reflejadas llegan al oyente antes de la extinción de la onda directa, es decir, en un tiempo menor que el de persistencia acústica del oído.

I.I.6-Absorción de las ondas.

Cuando una onda sonora alcanza una superficie, una parte de su energía se refleja, pero un porcentaje de ésta es absorbida por el nuevo medio. Todos los medios absorben un porcentaje de la energía que propagan, ninguno es completamente opaco.

En relación con la absorción ha de tenerse en cuenta:

- El coeficiente de absorción que indica la cantidad de sonido que absorbe una superficie en relación con la incidente.
- La frecuencia crítica es la frecuencia a partir de la cual una pared rígida empieza a absorber parte de la energía de las ondas incidentes.

Tipos de materiales en cuanto a su absorción

- Materiales resonantes, que presentan la máxima absorción a una frecuencia determinada: la propia frecuencia del material.

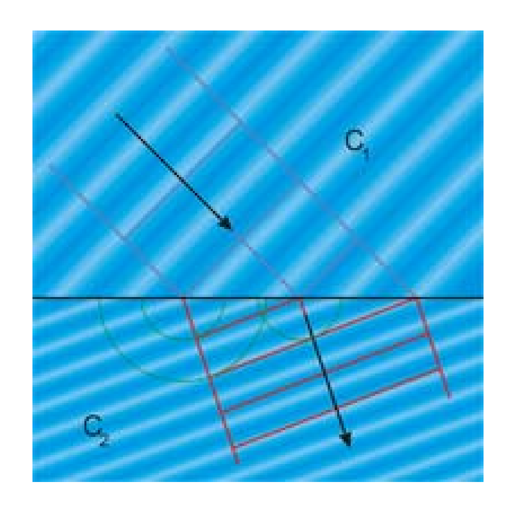
- Materiales porosos, que absorben más sonido a medida de que aumenta la frecuencia. Es decir, absorben con mayor eficacia las altas frecuencias (los agudos). Por ejemplo: la espuma acústica.
- Absorbentes en forma de panel o membrana absorben con mayor eficacia las bajas frecuencias (los graves), que las altas.
- *Absorbente Helmholtz.* Es un tipo de absorbente creado artificialmente que elimina específicamente unas determinadas frecuencias

I.I.7-Transmisión.

En muchos obstáculos planos (los separadores de los edificios) una parte de la energía se transmite al otro lado del obstáculo. La suma de la energía reflejada, absorbida y transmitida es igual a la energía sonora incidente (original).

I.I.8-Refracción de las ondas.

Es la desviación que sufren las ondas en la dirección de su propagación, cuando el sonido pasa de un medio a otro diferente. La refracción se debe a que al cambiar de medio, cambia la velocidad de propagación del sonido.



Fiura 5- Fenómeno de refracción

C_1 es el sonido incidente; C_2 el refractado

A diferencia de lo que ocurre en el fenómeno de la reflexión en la refracción, el ángulo de refracción ya no es igual al de incidencia. La refracción también puede producirse dentro de un mismo medio, cuando las características de este no son homogéneas, por ejemplo, cuando de un punto a otro de un medio aumenta o disminuye la temperatura.

Ejemplo: Sobre una superficie nevada, el sonido es capaz de desplazarse atravesando grandes distancias. Esto es posible gracias a las refracciones producidas bajo la nieve, que no es medio uniforme. Cada capa de nieve tiene una temperatura diferente. Las más profundas, donde no llega el sol, están más frías que las superficiales. En estas capas más frías próximas al suelo, el sonido se propaga con menor velocidad

I.I.9-Difracción o dispersión de la onda.

Se llama difracción al fenómeno que ocurre cuando el sonido, ante determinados obstáculos o aperturas, en lugar de seguir la propagación en la dirección normal, se dispersa.

La explicación la encontramos en el Principio de [*]Huygens que establece que cualquier punto de un frente de ondas es susceptible de convertirse en un nuevo foco emisor de ondas idénticas a la que lo originó. De acuerdo con este principio, cuando la onda incide sobre una abertura o un obstáculo que impide su propagación, todos los puntos de su plano se convierten en fuentes secundarias de ondas, emitiendo nuevas ondas, denominadas ondas difractadas.

---

[*]*Christiaan Huygens (1629-1695), astrónomo, matemático y físico holandés nacido en La Haya. Sus numerosos y originales descubrimientos científicos le valieron un amplio reconocimiento entre los científicos del siglo XVII. Entre sus descubrimientos destaca el principio (posteriormente llamado principio de Huygens) que establece que todo punto de un frente de ondas que avanza, actúa como una fuente de nuevas ondas. A partir de este principio, Huygens desarrolló la teoría ondulatoria de la* luz

La difracción se puede producir por dos motivos diferentes:

- Porque una onda sonora encuentra a su paso un pequeño obstáculo y lo rodea. Las bajas frecuencias son más capaces de rodear los obstáculos que las altas. Esto es posible porque las longitudes de onda en el espectro audible están entre 3 cm y 12 m, por lo que son lo suficientemente grandes para superar la mayor parte de los obstáculos que encuentran.
- Porque una onda sonora choca con un pequeño agujero y lo atraviesa. La cantidad de difracción estará dada en función del tamaño de la propia abertura y de la longitud de onda.
- Si una abertura es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño. La onda se propaga en líneas rectas o rayos, como la luz.
- Cuando el tamaño de la abertura es considerable en comparación con la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y el sonido se comporta como si fuese una luz que procede de una fuente puntual localizada en la abertura.

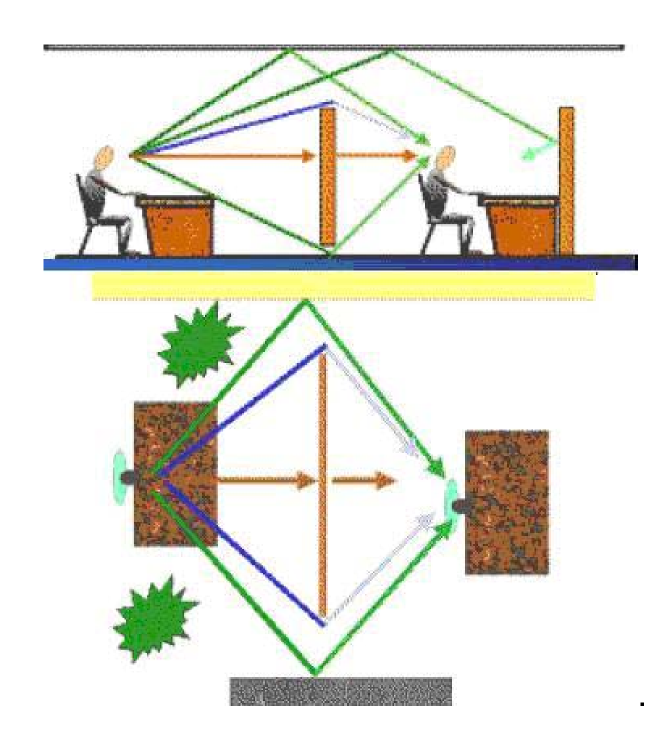


Figura 6-En la ilustración, la línea azul representa la difracción; la verde la reflexión y la marrón refracción.

II- La audición

II.1-Fisiología de la Audición.

Una de las funciones principales del oído es la de convertir las ondas sonoras en vibraciones que estimulen las células nerviosas, para ello el oído tiene tres partes claramente identificadas. Estas secciones están interconectadas y son el oído externo, el medio y el interno. Cada parte tiene funciones específicas dentro de la secuencia del procesamiento del sonido. El pabellón de la oreja capta y dirige las ondas sonoras hacia el conducto auditivo externo. Cuando las ondas sonoras llegan a la membrana del tímpano, las presiones altas y bajas alternadas del aire hacen que dicha membrana vibre hacia adelante y hacia atrás. La distancia que se mueve, que es mínima, depende de la intensidad y frecuencia de las ondas sonoras. La membrana timpánica vibra lentamente en respuesta a los sonidos de baja frecuencia (graves) y con rapidez ante sonidos de alta frecuencia (agudos).

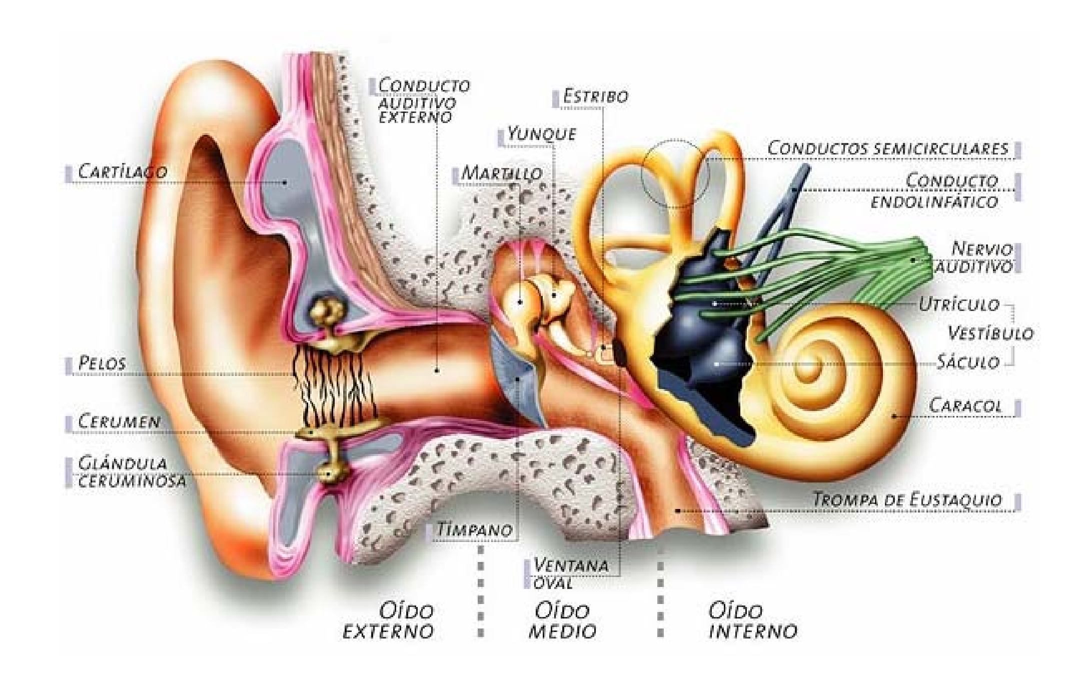


Figura 7-El oído

El área central de la membrana del tímpano esta conectada al martillo, que también empieza a vibrar y transmite el movimiento al yunque y éste a su vez al estribo.Cuando el estribo

oscila, desplaza la membrana de la ventana oval. Dicha ventana vibra con fuerza 20 veces mayor que la membrana del tímpano, ya que los huesecillos (figura 8) transforman eficazmente las vibraciones pequeñas y dispersas provenientes de un área de superficie grande (la membrana del tímpano) en vibraciones más grandes en un área de superficie menor (la ventana oval). [69]



Figura 8-Cadena de huesecillos

El movimiento de la ventana oval genera ondas de presión en la perilinfa del caracol. Al sobresalir la ventana oval hacia el interior, impulsa la perilinfa de la rampa vestibular.

Las ondas de presión se transmiten de la rampa vestibular a la timpánica y luego a la ventana redonda, lo cual hace que ésta sobresalga en el oído medio.

Conforme las ondas de presión deforman las paredes de las rampas vestibular y timpánica, éstas también desplazan en forma oscilatoria a la membrana vestibular, lo cual genera ondas de presión en la endolinfa del conducto del caracol. Figura 9.

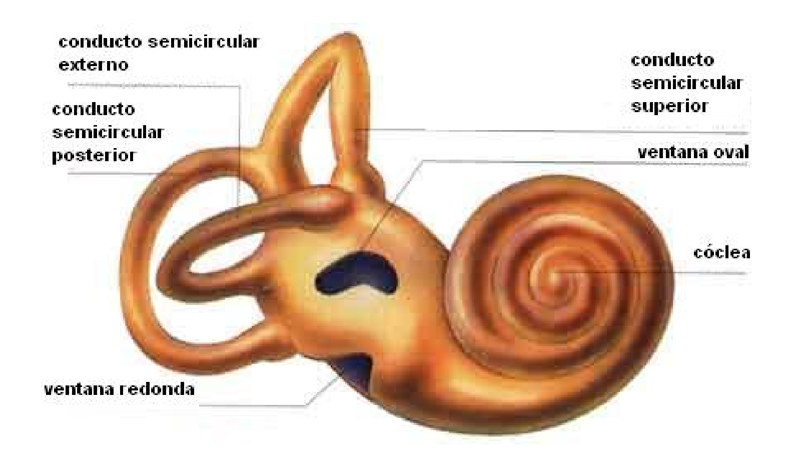


Figura 9- Caracol

Las ondas de presión en la endolinfa hacen que vibre la membrana basilar del conducto del caracol, lo cual mueve las células pilosas del órgano espiral contra la membrana tectoria. La flexión consecuente de los estereocilios produce potenciales de receptor, que finalmente se traducen en la generación de impulsos nerviosos en las fibras del nervio coclear.

De lo expuesto hasta aquí se deriva la interpretación de que el sonido es la sensación físicopsicofisiológica originada al interaccionar la vibración del aire con la membrana timpánica, cuando las frecuencias de las oscilaciones varia entre 20 y 20 000 Hz aproximadamente. Cuando la frecuencia es superior a los 25 000 Hz, se le define como ultrasonido.

La energía es transportada por la onda como energía potencial y cinética. La intensidad **I** de una onda sonora es la energía que pasa en un segundo en un área de 1 m^2, en otras palabras más prácticas, es la cantidad de watts que pasan por metro cuadrado.

El oído humano tiene una tolerancia limitada para la intensidad del sonido, la cual depende de la frecuencia de la onda. La unidad de intensidad es el bel, pero ésta resulta ser muy grande, así, comúnmente se usa el decibel (dB) que es la décima parte del bel. La máxima intensidad que el oído puede tolerar sin dolor es de aproximadamente 120 dB. [70]

Cuando una onda sonora golpea el cuerpo, una parte de ella se refleja y otra se trasmite en el cuerpo.

La razón de la presión reflejada **R** respecto a la incidente $\mathbf{A_0}$ depende de las impedancias acústicas de los dos medios $\mathbf{Z_1}$ y $\mathbf{Z_2}$; la impedancia acústica podemos entenderla como la capacidad que tiene el cuerpo para impedir el paso de energía a través de él. La razón de **R** a $\mathbf{A_0}$ es:

$$\frac{R}{A_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

mientras que la razón de la amplitud de la presión trasmitida **T** a la incidente $\mathbf{A_0}$ es:

$$\frac{T}{A_0} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Estas ecuaciones son válidas si la onda incide de forma normal a la superficie. Considerando que la onda pasa del aire al músculo:

$$\frac{R}{A_0} = \frac{1.64 \text{ X } 10^6 - 430}{1.64 \text{ X } 10^6 + 430} = 0.9995$$

$$\frac{T}{A_0} = \frac{2(1.64 \text{ X } 10^6}{1.64 \text{ X } 10^6 + 430} \sim 1.9995$$

Y las razones de las intensidades reflejada y trasmitida son:

$$\frac{R^2}{2Z_1} \Big/ \frac{{A_0}^2}{2Z_1} = \left(\frac{R}{A_0}\right) = 0.9990$$

$$\frac{T^2}{2Z_2} \Big/ \frac{{A_0}^2}{2Z_1} = \frac{Z_1}{Z_2}\left(\frac{T}{A_0}\right) =$$

$$\frac{430}{1.64 \text{ X } 10^6}(1.9995)^2 = 0.0010$$

Lo que nos indica que una parte muy pequeña del sonido es trasmitida al cuerpo.

No sucede así cuando las impedancias de los dos medios son muy parecidas, por ejemplo si el medio 1 es agua y el 2 es un músculo

$$\frac{R}{A_0} = \frac{(1.64 - 1.48) \times 10^6}{(1.64 + 1.48) \times 10^6} = 0.0513$$

$$\frac{T}{A_0} = 1.0513$$

Cuando una onda sonora pasa a través de la piel, hay pérdida de energía debido a los efectos de fricción. La absorción de energía en la piel causa una reducción en la amplitud de la onda sonora. La amplitud **A** decrece con la profundidad por cm en el medio, respecto a la amplitud inicial $\mathbf{A_0}$ **(X = 0)** y está dada por:

$$\mathbf{A = A_0\, e^{-ax}}$$

a es el coeficiente de absorción del medio, se mide en cm^{-1} y es función de la frecuencia del orden para el caso de hueso, en particular del cráneo.

Frecuencia (MHz)	a(cm^{-1})
0.6	0.4
0.8	0.9
1.2	1.7
1.6	3.2
1.8	4.2
2.25	5.3

Tabla.2- Coeficientes de absorción en función de la frecuencia

Como la intensidad es proporcional a la amplitud elevada al cuadrado, se tiene:

$$I = I_0 e^{-2ax}$$

Si reflexionamos un poco, podremos darnos cuenta de la importancia de lo anterior: muchos médicos pueden diagnosticar la enfermedad del paciente oyendo cómo se propaga el sonido en diferentes partes del cuerpo, ya que éste se comporta como un instrumento de percusión, como un tambor. El sonido cambia al cambiar las condiciones del cuerpo. En su trabajo, los diferentes órganos del cuerpo producen sonidos característicos, de manera que si el trabajo se ve alterado por alguna causa, el sonido que produce obviamente es diferente al normal. El médico se ayuda con el [*]*estetoscopio* para detectar estos sonidos, lo que se conoce como auscultación.

El estetoscopio consta de una campana que está abierta o cerrada por un diafragma delgado, un tubo y las salidas para los oídos del médico. La campana abierta acumula los sonidos del área de contacto, la piel que abarca hace las veces del diafragma. La frecuencia de resonancia es aquella que permite la mejor transmisión de los sonidos y depende, en este caso, del tipo de piel, del material de la campana y de la forma y medidas de ella. Una campana cerrada tiene una frecuencia de resonancia determinada, conocida, generalmente alta, que entona sonidos de baja frecuencia. La frecuencia de resonancia se controla presionando el estetoscopio sobre la piel.

**En 1819-El médico francés René Théophile Hyacinthe Laennec inventa el estetoscopio, un instrumento utilizado para la auscultación. Sirve, en su forma original, para oír los ruidos respiratorios y cardiacos del tórax*

Podría creerse que un estetoscopio es fácil de hacer; sin embargo, uno de buena calidad tiene su secreto: la campana debe ser de un material tal que permita oír nítidamente los sonidos captados; la longitud de los tubos es importante ya que su actividad dependerá de la frecuencia del sonido; el diámetro del tubo también es importante, en general se usan de 25 cm de longitud y 0.3 cm de diámetro; las piezas que se introducen en los oídos deben sellar perfectamente ya que de otra forma penetra el aire en el oído provocando mucho ruido del fondo, por último, la membrana es de un material especial que amplifica los sonidos provenientes del cuerpo.

El estudio especializado de las ondas sonoras se llama acústica, abarca frecuencias que van desde pocos Hz hasta10^{12} (1 000 000 000 000) Hz; audiología es el estudio del funcionamiento del oído y todo lo referente al mecanismo de la audición.

II.2-Cualidades del sonido.

El oído es capaz de distinguir unos sonidos de otros porque es sensible a las diferencias que puedan existir entre ellos en lo que concierne a alguna de las tres cualidades que caracterizan todo sonido y que son la intensidad, el tono y el timbre. Aun cuando todas ellas se refieren al sonido fisiológico, están relacionadas con diferentes propiedades de las ondas sonoras. [71]

II.2.a-Intensidad.

La intensidad del sonido percibido, o propiedad que hace que éste se capte como fuerte o como débil, esté relacionada con la intensidad de la onda sonora correspondiente, también llamada intensidad acústica.

La intensidad acústica es una magnitud que da idea de la cantidad de energía que está fluyendo por el medio como consecuencia de la propagación de la onda. Se define como la energía que atraviesa por segundo una superficie dispuesta perpendicularmente a la

dirección de propagación. Equivale a una potencia por unidad de superficie y se expresa en W/m^2. La intensidad de una onda sonora es proporcional al cuadrado de su frecuencia y al cuadrado de su amplitud y disminuye con la distancia al foco.

La magnitud de la sensación sonora depende de la intensidad acústica, pero también depende de la sensibilidad del oído. El intervalo de intensidades acústicas que va desde el umbral de audibilidad, o valor mínimo perceptible, hasta el umbral del dolor es muy amplio.

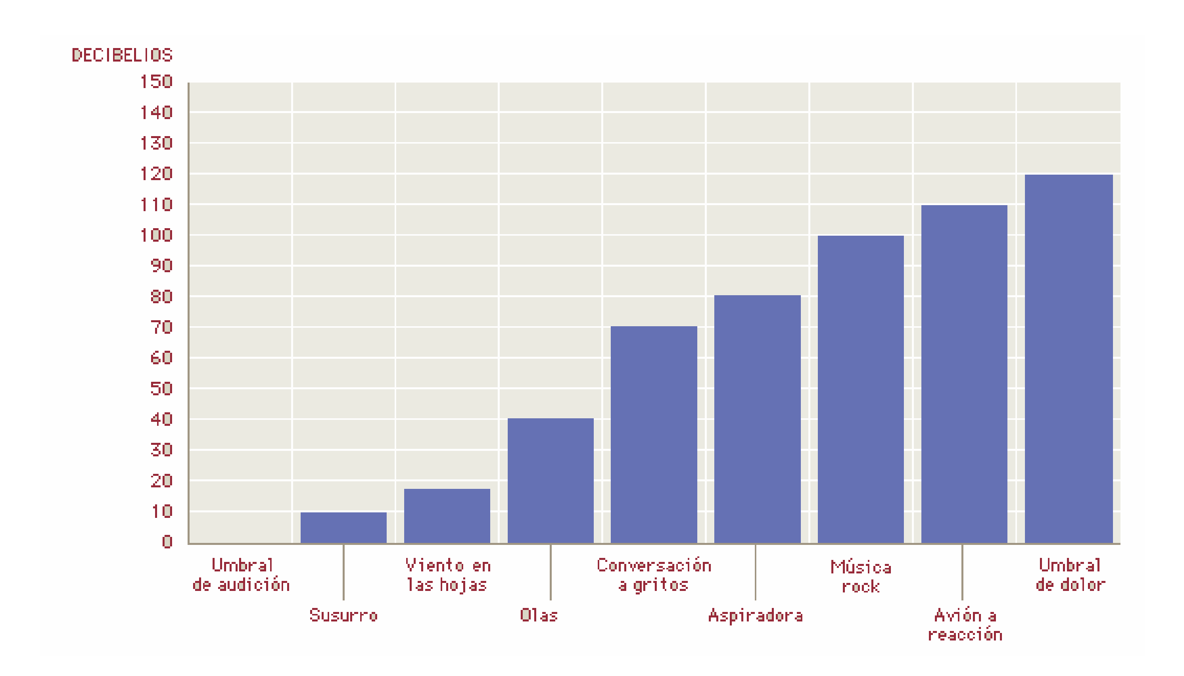


Tabla 3-- Intensidad fisiológica de un sonido. La intensidad fisiológica o sensación sonora de un sonido se mide en decibelios (dB). Por ejemplo, el umbral de la audición está en 0 dB, la intensidad fisiológica de un susurro corresponde a unos 10 dB y el ruido de las olas en la costa a unos 40 dB. La escala de sensación sonora es logarítmica, lo que significa que un aumento de 10 dB corresponde a una intensidad 10 veces mayor: por ejemplo, el ruido de las olas en la costa es 1.000 veces más intenso que un susurro, lo que equivale a un aumento de 30 dB.

Como ya se ha expresado, debido a la extensión de este intervalo de audibilidad, para expresar intensidades sonoras se emplea una escala cuyas divisiones son potencias de diez y cuya unidad de medida es el decibelio (dB). Ello significa que una intensidad acústica de 10 decibelios corresponde a una energía diez veces mayor que una intensidad de cero decibelios; una intensidad de 20 dB representa una energía 100 veces mayor que la que corresponde a 0 decibelios y así sucesivamente.

Otro de los factores de los que depende la intensidad del sonido percibido es la frecuencia. Ello significa que para una frecuencia dada un aumento de intensidad acústica da lugar a un aumento del nivel de sensación sonora, pero intensidades acústicas iguales a diferentes frecuencias pueden dar lugar a sensaciones distintas.

II.2.b-Tono.

El tono es la cualidad del sonido mediante la cual el oído le asigna un lugar en la escala musical, permitiendo, por tanto, distinguir entre los graves y los agudos. La magnitud física que esté asociada al tono es la frecuencia (figura 10). Los sonidos percibidos como graves corresponden a frecuencias bajas, mientras que los agudos son debidos a frecuencias altas. Así el sonido más grave de una guitarra corresponde a una frecuencia de 82,4 Hz y el más agudo a 698,5 Hz.

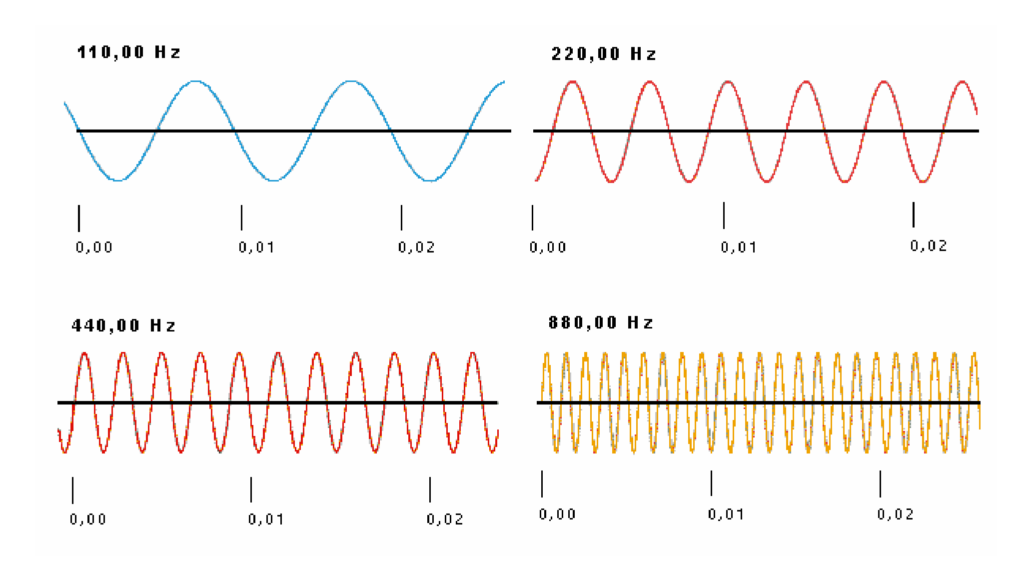


Figura 10-Diferentes frecuencias. Percibimos la frecuencia de los sonidos como tonos más graves o más agudos. La frecuencia es el número de ciclos (oscilaciones) que una onda sonora efectúa en un tiempo dado; se mide en hercios Hz (ciclos por segundo).

Junto con la frecuencia, en la percepción sonora del tono intervienen otros factores de carácter psicológico. Así sucede por lo general que al elevar la intensidad se eleva el tono percibido para frecuencias altas y se baja para las frecuencias bajas. Entre frecuencias

comprendidas entre 1000 y 3000 Hz el tono es relativamente independiente de la intensidad[72].

II.2.c-Timbre.

El timbre es la cualidad del sonido que permite distinguir sonidos procedentes de diferentes instrumentos, aun cuando posean igual tono e intensidad. Debido a esta misma cualidad es posible reconocer a una persona por su voz, que resulta característica de cada individuo.

El timbre está relacionado con la complejidad de las ondas sonoras que llegan al oído. Pocas veces las ondas sonoras corresponden a sonidos puros, sólo los diapasones (figura 11) generan este tipo de sonidos, que son debidos a una sola frecuencia y representados por una onda armónica.

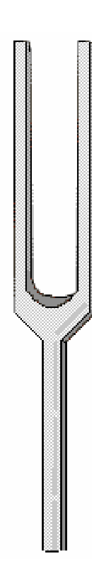


Figura 11-Diapasón, pequeña horquilla de dos puntas utilizada por los músicos para obtener, al golpearla, un sonido o tono fijo con el que se afinan los instrumentos. Se fabrica con una aleación de cromo, níquel y acero. Produce un sonido puro, casi sin armónicos, que no varía con los cambios de temperatura.

Los instrumentos musicales, por el contrario, dan lugar a un sonido más rico que resulta de vibraciones complejas. Cada vibración compleja puede considerarse compuesta por una serie de vibraciones armónico simples de una frecuencia y de una amplitud determinadas, cada una de las cuales, si se considerara separadamente, daría lugar a un sonido puro. Esta mezcla de tonos parciales es característica de cada instrumento y define su timbre.

Debido a la analogía existente entre el mundo de la luz y el del sonido, al timbre se le denomina también color del tono.

Como denominamos con anterioridad la *impedancia acústica* es la dificultad o resistencia que encuentran las ondas sonoras para su propagación por un medio. En otología impedancia es la resistencia que oponen la membrana timpánica y la cadena de huesecillos al paso de la energía sonora. El sistema del tímpano y los huesecillos tiene una función de *adaptador de impedancia*. Esta propiedad *optimizar* la cantidad de energía acústica transmitida a la cóclea desde el medio exterior. Entendemos por *impedanciometría* el conjunto de pruebas funcionales auditivas, que miden la resistencia que oponen la membrana timpánica y la cadena cuando sobre ellos incide un sonido.

Compliancia es lo contrario, la facilidad para permitir el paso de la energía, la tendencia a ceder, la propiedad de movilidad que muestran membrana y cadena cuando sobre ellas incide la energía de un sonido.

La impedancia acústica se traduce en la siguiente formula:

$$Z = \sqrt{r^2 + (M \cdot 2\pi f - \frac{S}{2\pi f})^2}$$

Donde Z = impedancia, r = roce, M = masa, S = rigidez, f = frecuencia

Ello explica que la impedancia:

- Aumente con el roce que se produce fundamentalmente en la cóclea.
- Aumente con la masa del sistema del tímpano y los huesecillos, en una medida tanto más elevada cuanto mayor es la frecuencia. Cuando la masa aumenta (tímpano espeso, dispositivo del tímpano/huesecillos demasiado pesado) la transmisión de los tonos agudos es peor.

- Aumente con la rigidez y, ello en una medida mayor cuanto menor es la frecuencia. Cuando se intensifica la rigidez del sistema de huesecillos (por ejemplo, en la **otoespongiosis*) se reduce la transmisión de los tonos graves a la vez que se optimiza la de los agudos.

II.3-Acciones contra el ruido.

El sonido indeseado se denomina ruido. El ruido incide negativamente en la salud; pérdida de la capacidad auditiva, alteración de los ritmos cardiaco y respiratorio; estrés, inquietud, mal humor, etc. Un ruido de sólo 40 dB impide descansar adecuadamente. [73]

La contaminación sonora empieza a reconocerse igual de potencialmente peligrosa que la contaminación atmosférica. El problema del ruido debe acometerse simultáneamente en todos los frentes: mejora de las disposiciones legales, control más eficaz de las emisiones, concienciación y colaboración ciudadana, aumento del aislamiento acústico de los edificios, etc.

Los sistemas de tratamiento acústico pueden actuar en la emisión, en la transmisión y en la recepción.

El tratamiento en la emisión consiste sencillamente en reducir el nivel de emisión y sus resultados inciden positivamente en todos los afectados. Los sistemas de tratamiento en la recepción actúan directamente sobre los afectados, individual o conjuntamente, evitando que los receptores oigan niveles indeseados de ruido (protectores auditivos, cabinas insonorizadas).

Los sistemas en la transmisión consisten esencialmente en interponer obstáculos que dificulten y limiten la propagación del sonido del emisor al receptor.

**La otoesclerosis u otoespongiosis es un proceso de causa desconocida que sólo se observa en el ser humano y afecta la capa endocondral de la cápsula ótica.*

Sin entrar en detalles, la eficacia de un sistema de tratamiento acústico se representa mediante su aislamiento acústico, el cual expresa la reducción que sufre el nivel de intensidad de un ruido debido al sistema acústico: un sistema que ofrece un aislamiento acústico al ruido aéreo de 20 dB reduce la intensidad acústica, pero de 20 dB en cuanto a la molestia asociada, ¡muy débil aislamiento! Por último, recordemos que la potencia acústica de la mayor parte de los focos sonoros es extraordinariamente débil: 6 millones de personas, hablando simultáneamente, emiten una potencia apenas suficiente para encender una bombilla eléctrica de 60 W. Sin embargo, los efectos del ruido pueden ser muy perjudiciales para la salud y los son siempre para la calidad de vida.

III- Aplicaciones del empleo de la física del sonido en medicina.

III.1- El estetoscopio

Uno de los principales ejemplos de la aplicación práctica de la física del sonido en la medicina es, sin lugar a dudas, el estetoscopio, también llamado fonendoscopio, el cual se ha convertido en símbolo de identidad de los médicos [74]. Este instrumento fue inventado en 1816 por el médico francés René Teófilo Jacinto Laennec (Figura 12) y es por medio de este que el médico puede identificar los sonidos asociados a diferentes procesos biológicos, distinguiendo de esta manera los principales factores descriptivos de las vibraciones de sonido de un único tono, frecuencia y amplitud, las cuales se perciben como la altura o tono de un sonido y el volumen, respectivamente. En los sonidos complejos, como lo son los respiratorios, por ejemplo, es la presencia de frecuencias más altas simultáneas, en particular armónicas, las que dan al sonido su carácter distintivo. Cuando se escucha un sonido complejo, en general oímos la nota más baja. El predominio de la nota más baja aumenta a medida que se incrementa la amplitud del sonido, lo que produce un

enmascaramiento de los componentes de frecuencias más altas por las frecuencias más bajas.



Figura 12- (Izquierda) Versión original del estetoscopio de Laennec, fabricado en madera de color claro; torneado por él mismo. (Derecha) Estetoscopio moderno

Los sonidos respiratorios son generados por el flujo de aire turbulento en la tráquea y bronquios proximales, mientras que el flujo de aire en las vías aéreas pequeñas y alvéolos tiene una velocidad menor, es de tipo laminar y por ende, silente. El parénquima pulmonar y la pared torácica actúan como un filtro al reducir las frecuencias más altas, los sonidos transmitidos desde las vías aéreas proximales son mayormente atenuados y se componen principalmente de bajas frecuencias. La mayoría de los sonidos respiratorios normales (murmullo vesicular) se encuentran entre 37.5 y 1 000 Hz, con la energía principal debajo de 100 Hz cuando están mezclados con sonidos cardíacos y musculares. Los sonidos de alta frecuencia no se esparcen tan difusamente o retienen tal amplitud a través de la pared torácica como lo hacen los sonidos de bajas frecuencias. Los sonidos de alta frecuencia y baja amplitud son importantes para localizar las patologías subyacentes. Cuando hay consolidación pulmonar se produce un incremento en la energía de frecuencias más altas debido a que el filtro de altas frecuencias se reduce. También hay una disminución de los

sonidos de baja frecuencia que provocan un menor enmascaramiento de los de alta frecuencia. El sonido resultante es de tono más alto y se asemeja al originado en bronquios y tráquea. Las frecuencias oscilan entre 240 y 1 000 Hz. Algunos sonidos agregados contienen picos fuertes de energía y pueden ser continuos y musicales, por ejemplo sibilancias, o discontinuos, explosivos y no musicales, como los rales. La energía principal de las sibilancias es mayor de 400 Hz; la de los roncus, menor de 200 Hz, y la de los rales, entre 750 y 1 200 Hz.

A pesar de los innegables avances en la calidad de los estudios por imágenes, el examen físico sigue siendo fundamental en la práctica asistencial, ya que todo médico, antes de solicitar estudios complementarios, debe arribar a una hipótesis diagnóstica basada en información obtenida de la anamnesis y examen físico del paciente.

III.2- La ecografía

La ecografía puede definirse como un medio diagnóstico médico basado en las imágenes obtenidas mediante el procesamiento de los ecos reflejados por las estructuras corporales, gracias a la acción de pulsos de ondas ultrasónicas.

Como se ha planteado en el epígrafe anterior, el sonido es la sensación producida a través del oído por una onda longitudinal originada por la vibración de un cuerpo elástico y propagada por un medio material.

El Ultrasonido podría entonces definirse como un tren de ondas mecánicas, generalmente longitudinales, originadas por la vibración de un cuerpo elástico y propagadas por un medio material y cuya frecuencia supera la del sonido audible por el genero humano: 20.000 ciclos/s (20 KHz) aproximadamente. Estas ondas sonoras corresponden básicamente a

rarefacción y compresión periódica del medio en el cual se desplazan como vemos en la gráfica siguiente:

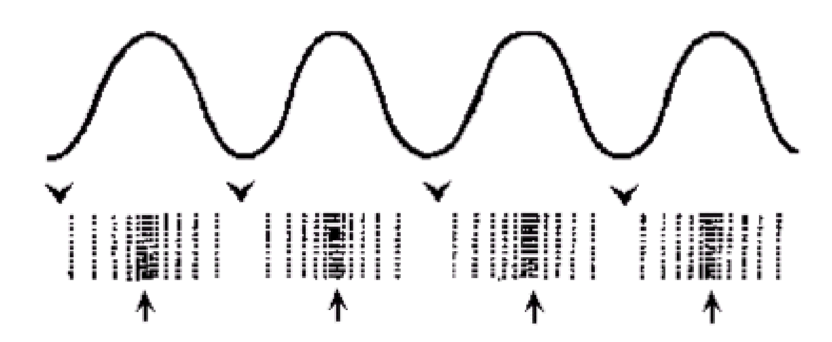


Figura 13-Fenómenos relacionados con la transmisión del sonido

Al igual que existe un espectro de ondas electromagnéticas, dentro del cual la luz visible ocupa una mínima porción existe un espectro de vibraciones acústicas, en el cual la gama de frecuencias audibles ocupa un mínimo porcentaje.

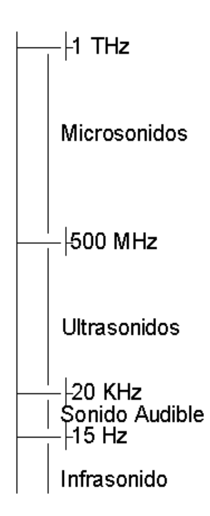


Figura 14- Espectro de frecuencias

Las vibraciones de un cuerpo elástico cuya frecuencia es mayor a 500 MHz se denominan *microsonidos.* Las comprendidas entre 500 MHz y 20 MHz se llaman *ultrasonidos*. El sonido

audible se encuentra entre los 20 KHz y los 15 Hz. El *infrasonido* se encuentra por debajo de los 15 Hz . En contraste, otros medios diagnósticos por imágenes utilizan ondas que corresponden al espectro electromagnético como son la gammagrafía y la radiología convencional, por acción directa de los fotones que impresionan el material sensible y la resonancia magnética nuclear que utiliza el efecto producido por ondas de radio sobre los átomos de hidrógeno alineados por medio de un campo magnético).[75]

En el caso de la *ecografía* esta utiliza la técnica del eco pulsado: Pulsar un cristal y enviar paquetes de energía dentro del paciente. Un pequeño porcentaje es reflejado en las diferentes interfases y llega al transductor el cual la traduce a un pequeño voltaje. El mayor porcentaje de energía atraviesa las diversas interfases y penetra a regiones mas profundas. Las interfases son los límites entre medios de diferentes impedancias. Impedancia (Z) es igual al producto de la densidad de un medio por la velocidad del sonido en dicho medio:

$$Z = VD$$

El transductor actúa como emisor y receptor. *Efecto piezoeléctrico, (modo receptor)* tiene lugar cuando una presión comprime la superficie del cristal en el transductor y lo hace liberar un voltaje en su superficie.

Efecto piezoeléctrico inverso, (modo emisor) ocurre cuando se aplica un voltaje a la superficie del cristal del transductor, produciendo una expansión del cristal.

La intensidad del pulso de corriente eléctrica que actúa sobre el cristal es = 1 a 300 v aprox. y dura <1.0 msg, que es el tiempo necesario para emitir el equivalente a 2-3 longitudes de onda, lo que equivale a 5-6 msg aproximadamente, quedando en silencio el tiempo suficiente para recibir los ecos superficiales así como lo provenientes de tejidos profundos para seguidamente emitir el siguiente pulso. [76]

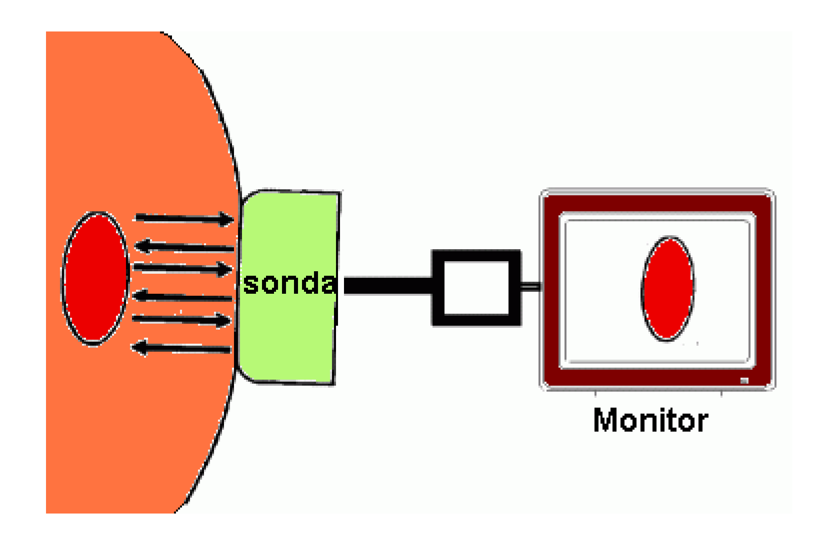


Figura 15- Principio básico de obtención de la imagen

La mayoría de equipos de ultrasonido emiten entre 500 y 3000 pulsos/s, con un promedio de 1000 pulsos/s, lo cual se conoce como frecuencia del pulso de recepción.

Un pulso está formado por tres componentes o fases: fase emisora, fase de equilibrio y fase receptora.

La fase emisora corresponde a la utilizada para la generación del haz acústico; la fase receptora corresponde a la usada para la recepción de los ecos provenientes de las interfases, tanto de las superficiales y medias, como profundas; y la fase de equilibrio corresponde al tiempo del pulso durante el cual no hay emisión ni recepción de ondas sonoras (cristal en equilibrio). [77]

En un transductor que actúa con una frecuencia de 1000 pulsos/s, la duración de cada pulso será de 1 ms, en el cual, como ya vimos, la fase emisora durará 5-6 s.

El tiempo restante: 994 s, o sea 99.4% del tiempo queda para las fases de equilibrio y receptora. La mayoría de los ecógrafos tienen un profundidad de exploración máxima promedio de 20 cm. Como la velocidad del sonido en los tejidos es de aproximadamente

1540 m/s, el tiempo empleado desde la emisión del haz ultrasónico hasta la recepción de los ecos provenientes de las interfases mas profundas será:

$$40\ cm/154\ 000\ cm/s = 0.26\ ms$$

Como el pulso (fase emisora + fase receptora) dura 1 ms, el 26% de ese tiempo es utilizado en recibir ecos.

La onda reflejada a nivel de la primera interfase significativa, la cual podemos considerar establecida a nivel de la superficie externa del transductor, recorrerá solamente 10 cm de ida y vuelta, demorando en ello 6.5 seg. La fase de equilibrio durará 0.734 ms o sea 73.4 % del tiempo. Tenemos entonces que:

PULSO (1 ms) = emisión (6 ms) + recepción (0.26 ms) + equilibrio (0.73 ms)

Las fases de equilibrio separan en el tiempo las fases activas y permiten el procesamiento de los ecos sin interferencias de los pulsos precedentes y siguientes. Como el tiempo empleado en el recorrido de las ondas depende de la velocidad del sonido, cuando existen grandes diferencias en las propiedades acústicas de los tejidos, por ejemplo al pasar de líquido a sólido, la relación tiempo distancia deja de ser lineal y se producen alteraciones en las medidas [78]. El resultado de este proceso se representa en la figura 16.



Figura 16- Ultrasonido renal

La ecografía bidimensional (eco 2-D) es una técnica de imagen en tiempo real ampliamente usada y su valor diagnóstico está bien establecido. Un experto puede reconstruir una imagen tridimensional en su mente a partir de una secuencia de múltiples imágenes bidimensionales. Sin embargo, la posibilidad de obtener imágenes de ciertos planos del espacio mediante eco 2-D es muy limitada, siendo imposible en algunos casos. En los últimos 10 años la ecografía tridimensional (eco 3- D) se ha introducido en la práctica clínica. Con esta tecnología podemos obtener una imagen en cualquier plano del espacio de un órgano o región de interés. Con la eco 3-D podemos obtener y almacenar un volumen de imágenes. Este volumen puede ser evaluado posteriormente cuantas veces sea requerido, permitiendo realizar navegaciones virtuales sobre la región de interés, reconstrucciones de superficies y cálculos de volúmenes[79]. Figura 17



Figura 17- Reconstrucción de un rostro fetal por ultrasonido 3-D

Otra modalidad de procesamiento de la señal ultrasónica es el estudio de la variación de frecuencia entre onda emitida y reflejada (efecto **Doppler*) que permite evaluar elementos tisulares en movimiento, determinar el sentido y velocidad del mismo.

La aplicación del diagnóstico médico por ultrasonido es muy amplia y actualmente abarca todas las especialidades; se requiere por tanto, un conocimiento del campo de aplicación, lo cual exige ser médico.

Además de los conocimientos médicos se requiere entrenamiento y educación en la física del sonido y la tecnología actual, así como la forma en que esta tecnología cambiante nos brinda las imágenes. Cualquier médico graduado, sin importar su especialidad, requiere entrenamiento en acústica, tecnología e imaginología sonográfica para practicar ecografías de buena calidad.

**Christian Doppler (1803-1853), físico y matemático austriaco. Describió el fenómeno físico que se conoce hoy como efecto Doppler en su artículo monográfico sobre los colores de la luz de las estrellas dobles,*

CAPÍTULO V

Física del sistema nervioso

I- Conceptos físicos fundamentales de electromagnetismo

I.1-Breve reseña histórica del desarrollo de la electrostática.

La electrostática es la rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos producidos por distribuciones de cargas estáticas, o sea, el campo electrostático de un cuerpo cargado. Históricamente la electrostática fue la rama del electromagnetismo que primero se desarrolló. Con la postulación de la Ley de **Coulomb* fue descrita y utilizada en experimentos de laboratorios a partir del siglo XVII, y ya en la segunda mitad del siglo XIX las leyes de Maxwell concluyeron definitivamente su estudio y explicación permitiendo demostrar cómo las leyes de la electrostática y las leyes que gobernaban los fenómenos magnéticos pueden ser estudiados en el mismo marco teórico denominado electromagnetismo. La existencia del fenómeno electrostático es bien conocido desde la antigüedad, existen numerosos ejemplos ilustrativos que hoy forma parte de la enseñanza moderna; como el de comprobar como ciertos materiales se cargan de electricidad por simple frotadura y atraen, por ejemplo, pequeños trozos de papel o pelos a un globo que previamente se ha frotado con un paño seco.

**Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806). Físico e ingeniero militar francés. Se recuerda por haber descrito de manera matemática la ley de atracción entre cargas eléctricas. En su honor la unidad de carga eléctrica lleva el nombre de coulomb (C).Fue el primero en establecer las leyes cuantitativas de la electrostática, además de realizar muchas investigaciones sobre: magnetismo, rozamiento y electricidad. Sus investigaciones científicas están recogidas en siete memorias, en las que expone teóricamente los fundamentos del magnetismo y de la electrostática.*

Alrededor del 600 a. C. el filósofo griego **Thales de Mileto* describió por primera vez fenómenos electrostáticos producidos al frotar fragmentos de ámbar y comprobar su capacidad de atracción sobre pequeños objetos. Algo más tarde, otro griego, ***Teofrasto*, realizó un estudio de los diferentes materiales que eran capaces de producir fenómenos eléctricos, escribiendo el primer tratado sobre la electricidad.[80] A comienzos del siglo XVII comienzan los primeros estudios sobre la electricidad y el magnetismo orientados a mejorar la precisión de la navegación con brújulas magnéticas.

El físico real británico ****William Gilbert* utiliza por primera vez la palabra electricidad del griego *elektron* (ámbar).

**Tales de Mileto (639 ó 624 a.-547/6 a. C.) fue el iniciador de la indagación racional sobre el universo. Se le considera el primer filósofo de la historia, y el fundador de la escuela jonia de filosofía, según el testimonio de Aristóteles. Fue el primero y más famoso de los Siete Sabios de Grecia (el sabio astrónomo) y tuvo como discípulo y protegido a Pitágoras. Es aparte uno de los más grandes astrónomos y matemáticos de su época, a tal punto que era una lectura obligatoria para cualquier matemático en la Edad Media y contemporánea. Sus estudios abarcaron profundamente el área de la Geometría, Álgebra lineal, Geometría del espacio y algunas ramas de la Física, tales como la Estática, Dinámica y Óptica. Su vida está envuelta en un halo de leyenda. Fue el primer filósofo jónico.*

***Teofrasto (372-287 a.C.), filósofo griego. Teofrasto escribió sobre lógica, política, poesía, metafísica y cualquier otra área de estudio de su tiempo. Han perdurado también partes de su Historia de la física, nueve tratados científicos que abarcan De las piedras, Del fuego y De los vientos*

****William Gilbert, (1544 –1603). Médico inglés. Fue uno de los primeros filósofos naturales de la era moderna en realizar experimentos con la electrostática y el magnetismo. Definió el término de fuerza eléctrica como el fenómeno de atracción que se producía al frotar ciertas sustancias. A través de sus experiencias clasificó los materiales en conductores y aislantes e ideó el primer electroscopio. Descubrió la imantación por influencia, y observó que la imantación del hierro se pierde cuando se calienta al rojo. Su principal obra fue sobre el imán y los cuerpos magnéticos y sobre el gran imán la Tierra publicada en Londres en el año 1600, conocido popularmente como "De Magnate".*

El jesuita italiano **Niccolo Cabeo* analizó sus experimentos y fue el primero en comentar que había fuerzas de atracción entre ciertos cuerpos y de repulsión entre otros. Alrededor de 1672 el físico alemán ***Otto von Guericke* construye la primera máquina electrostática capaz de producir y almacenar energía eléctrica estática por rozamiento. Esta máquina consistía en una bola de azufre atravesada por una varilla que servía para hacer girar la bola. Las manos aplicadas sobre la bola producían una carga mayor que la conseguida hasta entonces.[81] En 1733 el francés ****Francois de Cisternay du Fay* propuso la existencia de dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa, constatando:

- los objetos frotados contra el ámbar se repelen
- también se repelen los objetos frotados contra una barra de vidrio
- sin embargo, los objetos frotados con el ámbar atraen los objetos frotados con el vidrio.

**Niccolò Cabeo (1586 -1650) fue un filósofo jesuita italiano. Es conocido por sus contribuciones a la física. William Gilbert. Cabeo pensaba que la Tierra estaba inmóvil y, así no aceptó su movimiento como la causa del campo magnético*

***Otto von Guericke, (1602–1686) físico alemán.. En 1654, hizo una espectacular demostración de la inmensa fuerza que la atmósfera podía ejercer. Mostró que cuando dos hemisferios de cobre de 50 centímetros de diámetro perfectamente ajustados eran unidos de manera que formasen una esfera y se hacía el vacío en su interior, dos tiros de ocho caballos cada uno no podían separarlos.*

****Charles François de Cisternay du Fay (1698–1739) físico francés, dedicó su vida al estudio de los fenómenos eléctricos. Du Fay observó que una lámina de oro siempre era repelida por una barra de vidrio electrificada. Publicó sus trabajos en 1733 siendo el primero en identificar la existencia de dos tipos de cargas eléctricas (las denominadas hoy en día positiva y negativa), que él denominó carga vitria y carga resinosa, debido a que ambas se manifestaban: de una forma al frotar, con un paño de seda, el vidrio(carga positiva) y de forma distinta al frotar, con una piel, algunas substancias resinosas como el ámbar o la goma, (carga negativa).*

Du Fay y Stephen Gray fueron dos de los primeros "físicos eléctricos" en frecuentar plazas y salones para popularizar y entretener con la electricidad. Como ejemplo, se electriza a las personas y se producen descargas eléctricas, siendo un ejemplo, el llamado beso eléctrico al electrificar una dama y esta dar un beso a una persona no electrificada. En 1767, **Joseph Priestley* publicó su obra *The History and Present State of Electricity* sobre la historia de la electricidad hasta la fecha [82]*.* El libro sería durante un siglo el referente para el estudio de la electricidad. En el, Priestley anuncia también alguno de sus propios descubrimientos como era la conductividad del carbón. Hasta entonces se pensaba que solo el agua y los metales podían conducir la electricidad. En 1785 el físico francés Charles Coulomb publicó un tratado en el que se describían por primera vez cuantitativamente las fuerzas eléctricas, formulando las leyes de atracción y repulsión de cargas eléctricas estáticas, usando la balanza de torsión para realizar sus medidas. En su honor estas leyes se conocen con el nombre de ley de Coulomb. Esta ley, junto con su elaboración matemática más sofisticada a través del teorema de Gauss y la derivación de los conceptos de campo eléctrico y potencial eléctrico, describen la práctica totalidad de los fenómenos electrostáticos [83.] Durante todo el siglo posterior se sucedieron avances significativos en el estudio de la electricidad, los fenómenos eléctricos producidos por cargas en movimiento en el interior de un material conductor. Finalmente, en 1864 el físico escocés James Clerk Maxwel*l* unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo en un conjunto reducido de leyes matemáticas.

**Joseph Priestley (1733–1804) Químico angloamericano. Durante años se le reconoció como descubridor del oxígeno.*

I.2-Electricidad estática

La electricidad estática es un fenómeno que se debe a una acumulación de cargas eléctricas en un objeto. Esta acumulación puede dar lugar a una descarga eléctrica cuando dicho objeto se pone en contacto con otro. Antes del año 1832, que fue cuando **Michael Faraday* publicó los resultados de sus experimentos sobre la identidad de la electricidad, los físicos pensaban que la "electricidad estática" era algo diferente de las otras cargas eléctricas. Michael Faraday demostró que la electricidad inducida desde un imán, la electricidad producida por una batería, y la electricidad estática son todas iguales. [84] La electricidad estática se produce cuando ciertos materiales se frotan uno contra el otro, como lana contra plástico o las suelas de zapatos contra la alfombra, donde el proceso de frotamiento causa que se retiren los electrones de la superficie de un material y se reubiquen en la superficie del otro material que ofrece niveles energéticos más favorables. La capacidad de electrificación de los cuerpos por rozamiento se denomina efecto triboeléctrico, existiendo una clasificación de los distintos materiales denominada secuencia triboeléctrica.

I.3-Carga eléctrica

En física, carga eléctrica es una propiedad intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante atracciones y repulsiones que determinan las interacciones electromagnéticas entre ellas. La materia cargada eléctricamente es influida por los campos electromagnéticos siendo, a su vez, generadora de ellos.

**Michael Faraday (1791-1867) físico y químico británico que estudió el electromagnetismo y la electroquímica. es conocido principalmente por su descubrimiento de la inducción electromagnética, que ha permitido la construcción de generadores y motores eléctricos, y de las leyes de la electrólisis; por lo que es considerado como el verdadero fundador del electromagnetismo y de la electroquímica.*

La interacción entre carga y campo eléctrico es la fuente de una de las cuatro interacciones fundamentales, la interacción electromagnética [85].

La carga eléctrica es de naturaleza discreta, fenómeno demostrado experimentalmente por **Robert Millikan*. Por razones históricas, los electrones tienen carga -1, también notada *-e*. Los protones tienen la carga opuesta, +1 o +*e*.

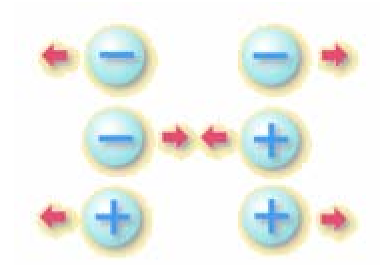


Figura 1- Interacciones entre cargas de igual y distinta naturaleza

En el Sistema Internacional de Unidades la unidad de carga eléctrica se denomina culombio (símbolo C). Se define como la cantidad de carga que pasa por una sección en 1 segundo cuando la corriente eléctrica es de 1 amperio, y se corresponde con la carga de $6{,}24 \times 10^{18}$ electrones aproximadamente. La carga eléctrica es una propiedad intrínseca de la materia que se presenta de dos tipos. Cuando cargas del mismo tipo se encuentran se repelen y cuando son diferentes se atraen. Éstas ahora llevan el nombre con las que ***Benjamín Franklin* las denominó: cargas positivas y negativas.

**Robert Andrews Millikan (1868-1953) fue un físico estadounidense que ganó el Premio Nóbel de Física en 1923 primordialmente por su trabajo para determinar el valor de la carga del electrón y el efecto fotoeléctrico*

***Benjamín Franklin (1706-1790), filósofo, político y científico estadounidense. En 1747 Franklin inició sus experimentos sobre la electricidad. Inventó el pararrayos y presentó la llamada teoría del fluido único para explicar los dos tipos de electricidad, positiva y negativa*

I.4-Principio de conservación de la carga

En concordancia con los resultados experimentales, el *principio de conservación de la carga* establece que no hay destrucción ni creación neta de carga eléctrica, y afirma que en todo proceso electromagnético la carga total de un sistema aislado se conserva.

En un proceso de electrización, el número total de protones y electrones no se altera y sólo hay una separación de las cargas eléctricas. Por tanto, no hay destrucción ni creación de carga eléctrica, es decir, la carga total se conserva. Pueden aparecer cargas eléctricas donde antes no había, pero siempre lo harán de modo que la carga total del sistema permanezca constante. Además esta conservación es local, ocurre en cualquier región del espacio por pequeña que sea.

I.5-Aislantes y conductores

Los materiales se comportan de forma diferente a la hora de adquirir una carga eléctrica. Así, una varilla metálica sostenida con la mano y frotada con una piel no resulta cargada.

Sin embargo, sí es posible cargarla cuando al frotarla se usa un mango de vidrio o de ebonita y el metal no se toca con las manos al frotarlo. La explicación es que las cargas se pueden mover libremente entre el metal y el cuerpo humano, mientras que el vidrio y la ebonita no permiten hacerlo, aislando la varilla metálica del cuerpo humano.

Esto se debe a que en ciertos materiales, típicamente en los metales, los electrones más alejados de los núcleos respectivos adquieren fácilmente libertad de movimiento en el interior del sólido. Estos *electrones libres* son las partículas que transportarán la carga eléctrica. Al depositar electrones en ellos, se distribuyen por todo el cuerpo, y viceversa, al perder electrones, los electrones libres se redistribuyen por todo el cuerpo para compensar la pérdida de carga. Estas sustancias se denominan *conductores*.

En contrapartida a los conductores eléctricos, existen materiales en los cuales los electrones están firmemente unidos a sus respectivos átomos. En consecuencia, estas sustancias no poseen electrones libres y no será posible el desplazamiento de carga a través de ellos. Al depositar una carga eléctrica en ellos, la electrización se mantiene localmente. Estas sustancias son denominadas *aislantes* o *dieléctricos*. El vidrio, la ebonita o el plástico son ejemplos típicos.

La distinción entre conductores y aislantes no tiene nada de absoluto: la resistividad no es infinita (pero sí muy grande), y las cargas eléctricas libres, prácticamente ausentes de los buenos aislantes, pueden crearse fácilmente suministrando la cantidad adecuada de energía para separar a un electrón del átomo al que esté ligado (por ejemplo, mediante irradiación o calentamiento). Así, a una temperatura de 3000º K todos los materiales son conductores. [86]

Entre los buenos conductores y los dieléctricos existen múltiples situaciones intermedias. Entre ellas destacan los materiales semiconductores por su importancia en la fabricación de dispositivos electrónicos que son la base de la actual revolución tecnológica. En condiciones ordinarias se comportan como dieléctricos, pero sus propiedades conductoras se alteran mediante la adición de una minúscula cantidad de sustancias dopantes, consiguiendo que el material semiconductor tenga las propiedades conductoras necesarias con la aplicación de un cierto potencial eléctrico. Ciertos metales adquieren una conductividad infinita a temperaturas muy bajas, es decir, la resistencia al flujo de cargas se hace cero. Se trata de los superconductores. Una vez que se establece una corriente eléctrica en un superconductor, los electrones fluyen por tiempo indefinido.

I.6-Carga inducida

La carga inducida se produce cuando un objeto cargado repele o atrae los electrones de la superficie de un segundo objeto. Esto crea una región en el segundo objeto que está más cargada positivamente, creándose una fuerza atractiva entre los objetos.

Por ejemplo, cuando se frota un globo, el globo se mantendrá pegado a la pared debido a la fuerza atractiva ejercida por dos superficies con cargas opuestas (la superficie de la pared gana una carga eléctrica inducida pues los electrones libres de la superficie del muro son repelidos por los electrones que ha ganado el globo al frotarse, creando una superficie de carga positiva en la pared, que luego atrae a la superficie del globo). En los efectos eléctricos cotidianos, no los de los aceleradores de partículas, solamente se mueven los electrones. La carga positiva del átomo, dada por los protones, permanece inmóvil.

I.7-La ley de Coulomb

La ecuación fundamental de la electrostática es la ley de Coulomb, que describe la fuerza entre dos cargas puntuales Q_1 y Q_2. Dentro de un medio homogéneo como es el aire, la relación se expresa como:

$$\mathbf{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon r^2}\hat{r}$$

donde *F* es la fuerza, εes una constante característica del medio, llamada la **permitividad*. En el caso del vacío, se denota como ε_0.

permitividad (o impropiamente constante dieléctrica) es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. La permitividad del vacío ε_0 es 8,8541878176x10^{-12} F/m.

La permitividad del aire es solo un 0,5 % superior a la del vacío, por lo que a menudo se usan indistintamente. Las cargas del mismo signo se repelen entre sí, mientras que las cargas de signo opuesto se atraen entre sí. La fuerza es proporcional al producto de las cargas eléctricas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas. La acción a distancia se efectúa por medio del campo eléctrico (Figura 1) existente en el punto en el cual está situado cada carga [87].

I.8-El campo eléctrico

El campo eléctrico (en unidades de voltios por metro) se define como la fuerza (en newtons) por unidad de carga (en coulombs). De esta definición y de la ley de Coulomb, se desprende que la magnitud de un campo eléctrico ***E*** creado por una carga puntual ***Q*** es:

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_o r^2}\hat{r}$$

Para la construcción de líneas de fuerza se debe tener en cuenta lo siguiente:

A.- Por convención, las líneas deben partir de cargas positivas y terminar en cargas negativas y en ausencia de unas u otras deben partir o terminar en el infinito. Una carga puntual positiva dará lugar a un mapa de líneas de fuerza radiales, pues las fuerzas eléctricas actúan siempre en la dirección de la línea que une a las cargas interactuantes, y dirigidas hacia fuera porque una carga de prueba positiva se desplazaría en ese sentido.

En el caso del campo debido a una carga puntual (figura 2) negativa el mapa de líneas de fuerza sería análogo, pero dirigidas hacia ella ya que ese sería el sentido en que se desplazaría la carga positiva de prueba. Como consecuencia de lo anterior, en el caso de los campos debidos a varias cargas, las líneas de fuerza nacen siempre de las cargas positivas y por ello son denominadas manantiales y mueren en las negativas por lo que se les llama sumideros (figura 3)

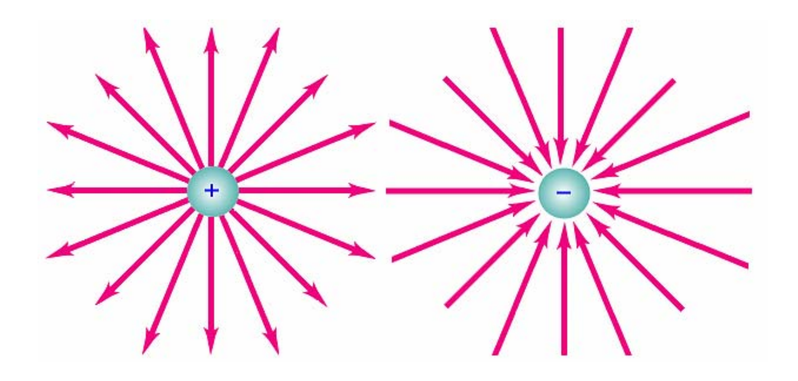


Figura 2-Representación de campos eléctricos creados por cargas puntuales negativas y positivas

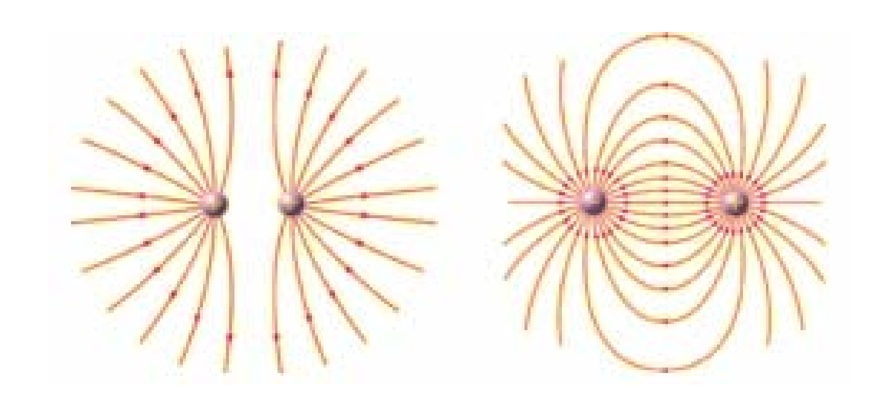


Figura 3-Representación del campo eléctrico producido por dos cargas

B.- Las líneas de fuerza jamás pueden cruzarse.

Las líneas de fuerza o de campo salen de una carga positiva o entran a una negativa. De lo anterior se desprende que de cada punto de la superficie de una esfera, suponiendo forma esférica para una carga, puede salir o entrar solo una línea de fuerza, en consecuencia entre dos cargas que interactúan solo puede relacionarse un punto de su superficie con solo un punto de la otra superficie, y ello es a través de una línea, y esa línea es la línea de fuerza.

I.9-Condensador

También llamado capacitor, es un dispositivo que almacena carga eléctrica. En su forma más sencilla, un condensador está formado por dos placas metálicas (armaduras) separadas por una lámina no conductora o dieléctrico. Al conectar una de las placas a un

generador, ésta se carga e induce una carga de signo opuesto en la otra placa. Si tenemos dos placas metálicas neutras y las conectamos cada una a un polo de una batería, habrá una transferencia de electrones desde la batería hacia las placas del condensador. La diferencia de potencial que resultará en el condensador, será igual al de la batería. Luego, si quitamos la batería, entonces las placas quedarán cargadas. La carga de un condensador es la carga de cualquiera de sus placas, sin importar el signo. La *capacidad* de un condensador se define como la razón entre su carga y la diferencia de potencial. [88]

$$C = Q / \Delta V$$

Donde **ΔV** es la diferencia de potencial entre sus armaduras y **Q** la carga.

La unidad de capacidad es el farad o faradio F, aunque se suelen emplear submúltiplos de esta unidad como el microfaradio μF=10^{-6} F, y el picofaradio, pF=10^{-12} F.

I.10-Corriente eléctrica

En un conductor recorrido por una *corriente eléctrica*, el cociente entre la diferencia de potencial aplicada a los extremos del conductor y la intensidad de la corriente que por él circula es una cantidad *constante*, que depende del conductor. A esta cantidad se le denomina resistencia. Como resultado de su investigación, en la que experimentaba con materiales conductores, el científico alemán **Georg Simon Ohm* llegó a determinar que la relación entre voltaje y corriente era constante y nombró a esta constante resistencia.[89] La ley enunciada verifica la relación entre voltaje y corriente en un resistor.

**Georg Simon Ohm (1787-1854), físico alemán conocido sobre todo por su investigación de las corrientes eléctricas. Su formulación de la relación entre intensidad de corriente, diferencia de potencial y resistencia constituye la ley de Ohm. La unidad de resistencia eléctrica se denominó ohmio en su honor*

I.11-Ley de Ohm

La Ley de Ohm establece que "La intensidad de la corriente eléctrica que circula por un dispositivo es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo", se puede expresar matemáticamente en la siguiente ecuación:(figura 4)

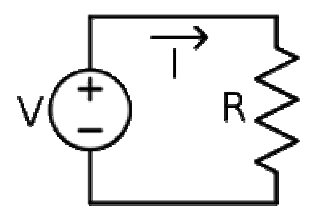


Figura 4- Circuito mostrando la Ley de Ohm: Una fuente eléctrica con una diferencia de potencial V, produce una corriente eléctrica I cuando pasa a través de la resistencia R

$$I = \frac{V}{R}$$

donde, empleando unidades del Sistema Internacional, tenemos que:

- I = Intensidad en amperios (A)
- V = Diferencia de potencial en voltios (V)
- R = Resistencia en ohmios (Ω).

Esta ley define una propiedad específica de ciertos materiales por la que se cumple la relación:

$$V = I \cdot R$$

Un conductor cumple la Ley de Ohm sólo si su curva *V-I* es lineal, esto es si R es independiente de V y de I.

Sin embargo, la relación:

$$R = \frac{V}{I}$$

sigue siendo la definición general de la resistencia de un conductor, independientemente de si éste cumple o no con la Ley de Ohm.

En hidráulica se verifica una ley similar a la Ley de Ohm, que puede facilitar su comprensión. Si tenemos un fluido dentro de un tubo, la diferencia de presiones entre sus extremos equivale a la diferencia de potencial o tensión; el caudal a través del conducto equivale a la intensidad de la corriente eléctrica; y la suma de obstáculos que impiden la corriente del fluido equivale a la resistencia eléctrica.

I.12-Ley de Joule

Si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. Este efecto es conocido como *Efecto Joule* en honor a su descubridor el físico británico *James Prescott Joule*(1818-1889), que lo estudió en la década de 1860.

Causas del fenómeno: Los sólidos tienen generalmente una estructura cristalina, ocupando los átomos o moléculas los vértices de las celdas unitarias y, a veces también, el centro de la celda o de sus caras. Cuando el cristal es sometido a una diferencia de potencial, los electrones son impulsados por el campo eléctrico a través del sólido debiendo en su recorrido atravesar la intrincada red de átomos que lo forma. En su camino, los electrones chocan con estos átomos perdiendo parte de su energía cinética, que es cedida en forma de calor.

Este efecto fue definido de la siguiente manera: "La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la

corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente [90]

Matemáticamente se expresa como

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

donde:

Q = energía calorífica producida por la corriente

I = intensidad de la corriente que circula y se mide en amperios

R = resistencia eléctrica del conductor y se mide en ohms

t = tiempo el cual se mide en segundos

Así, la potencia disipada por efecto Joule será:

$$P = R \cdot I^2 = \frac{V^2}{R}$$

donde *V* es la diferencia de potencial entre los extremos del conductor.

I.13-Leyes de Kirchhoff

Las leyes (o Lemas) de Kirchhoff fueron formuladas por **Gustav Robert Kirchhoff* en 1845, mientras aún era estudiante, estas son la Ley de los nodos o ley de corrientes y la Ley de las "mallas" o ley de tensiones.

**Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), físico alemán. Kirchhoff dirigió importantes investigaciones sobre la transferencia de calor y también expuso dos reglas, actualmente conocidas como leyes de Kirchhoff, con respecto a la distribución de corriente en circuitos eléctricos.*

Son muy utilizadas en ingeniería eléctrica para obtener los valores de intensidad de corriente y potencial en cada punto de un circuito eléctrico. Surgen de la aplicación de la ley de conservación de la energía. [91]

1ra- Ley de circuito de Kirchhoff

En todo nodo, donde la densidad de la carga no varíe en un instante de tiempo, la suma de corrientes entrantes es igual a la suma de corrientes salientes.

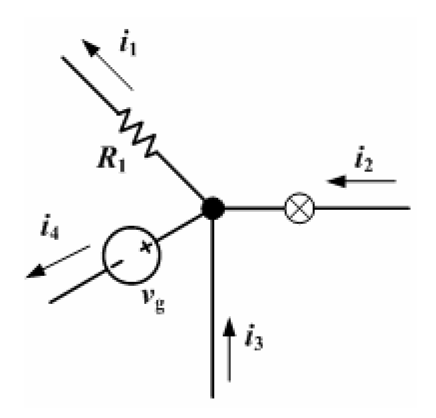


Figura 5- 1ra Ley de circuito de Kirchhoff

Un enunciado alternativo es:

En todo nudo la suma algebraica de corrientes debe ser 0 (cero).

$$\sum_{k=1}^{n} I_k = I_1 + I_2 + I_3 \ldots + I_n = 0$$

2da- Ley de circuito de Kirchhoff

En toda malla la suma de todas las caídas de tensión es igual a la suma de todas las subidas de tensión.

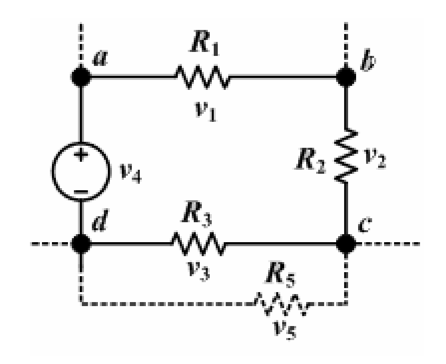


Figura 6- 2da Ley de circuito de Kirchhoff

Un enunciado alternativo es:

En toda malla la suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico debe ser 0 (cero).

$$\sum_{k=1}^{n} V_k = V_1 + V_2 + V_3 \ldots + V_n = 0$$

I.14-Magnetismo

Uno de los aspectos del electromagnetismo es que es una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Las fuerzas magnéticas son producidas por el movimiento de partículas cargadas, como por ejemplo electrones, lo que indica la estrecha relación entre la electricidad y el magnetismo. El marco que aúna ambas fuerzas se denomina teoría electromagnética. La manifestación más conocida del magnetismo es la fuerza de atracción o repulsión que actúa entre los materiales magnéticos como el hierro.

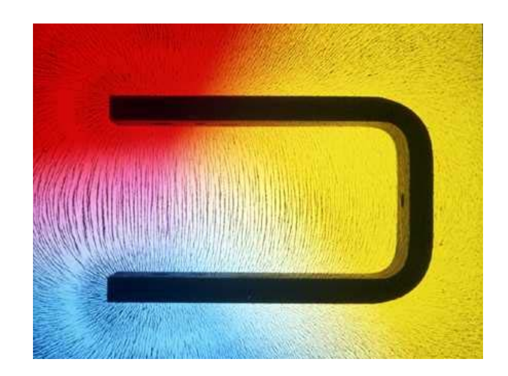


Figura 7- Líneas de fuerza magnéticas El campo magnético de un imán de herradura se pone de manifiesto por la distribución de las limaduras de hierro, que indican la intensidad y dirección del campo en cada punto. Las limaduras se alinean con las líneas

El fenómeno del magnetismo se conoce desde tiempos antiguos. La piedra imán o magnetita, un óxido de hierro que tiene la propiedad de atraer los objetos de hierro, ya era conocida por los griegos, los romanos y los chinos.

En 1600, *William Gilbert,* postuló que la Tierra actuaba como un potente imán esférico. Las brújulas se orientaban hacia los polos magnéticos terrestres. Afirma que los trozos de imán se comportan también como imanes, es decir, sabemos que hay cargas eléctricas aisladas, pero no existen polos magnéticos aislados, siempre hay imanes (dipolos completos), nunca un polo norte o sur solo. Esto hoy en día está en discusión, pues en ciertos experimentos se han detectado monopolos magnéticos. Esto aún necesita confirmación.

Los polos magnéticos no coinciden con los polos geográficos, es decir que las brújulas no indican con exactitud el norte geográfico. A esto se le llama *declinación magnética.*

Cuando una carga se mueve frente a un alambre cargado, la densidad de carga positiva en el alambre ya no es igual a la densidad de las partículas negativas. En efecto, la distancia entre iones positivos se contrae de manera diferente a la forma en que lo hace la distancia entre los electrones, y la densidad de carga cambia. Ésta siente una fuerza eléctrica causada por la contracción de **Lorentz*. Resumimos lo anterior diciendo que una corriente eléctrica origina un nuevo tipo de campo, el campo magnético, que actúa sobre cargas que se mueven en la vecindad de las corrientes, produciendo una fuerza, la fuerza magnética.

**Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), físico holandés, premiado con el Nóbel. Desarrolló la teoría electromagnética de la luz y la teoría electrónica de la materia, y formuló una teoría consistente sobre electricidad, magnetismo y luz*

Tal y como hicimos con el campo eléctrico, podemos dibujar el campo magnético. A diferencia de lo que sucede con una barra de ámbar electrizada por frotamiento (la cual atrae hacia sí todo tipo de objetos con la condición de que sean ligeros), un imán ordinario sólo ejerce fuerzas magnéticas sobre cierto tipo de materiales, en particular sobre el hierro. Este fue uno de los obstáculos que impidieron una aproximación más temprana entre el estudio de la electricidad y el del magnetismo [92.] Las fuerzas magnéticas son fuerzas de acción a distancia, es decir, se producen sin que exista contacto físico entre los dos imanes. Esta circunstancia, que excitó la imaginación de los filósofos antiguos por su difícil explicación, contribuyó más adelante al desarrollo del concepto de campo de fuerzas. En la figura 8 se ven las líneas de campo magnético producidas por un alambre por donde pasa corriente. En el caso magnético, a diferencia del eléctrico, la fuerza sobre una partícula que se mueve es perpendicular a las líneas del campo, como también se indica.

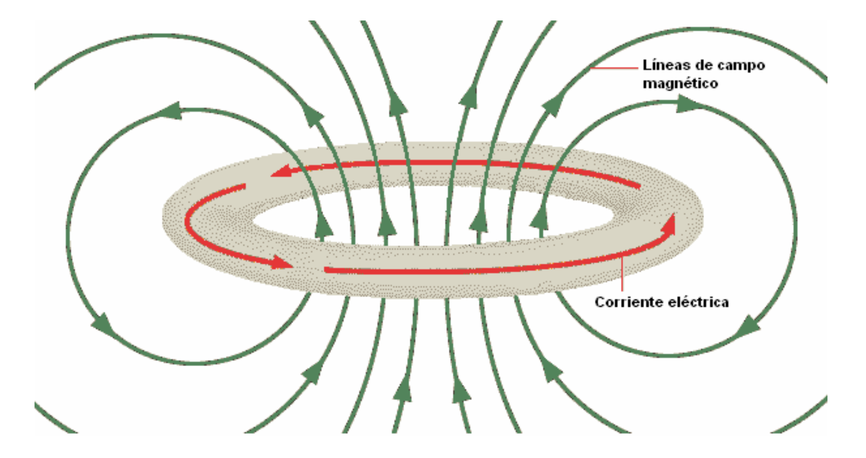


*Fig. 8- Campos magnéticos y corrientes En 1813, *Hans Christian Oersted predijo que se hallaría una conexión entre la electricidad y el magnetismo. En 1819 colocó una brújula cerca de un hilo recorrido por una corriente y observó que la aguja magnética se desviaba. Con ello demostró que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos. Aquí vemos cómo las líneas del campo magnético rodean el cable por el que fluye la corriente.*

**Hans Christian Oersted (1777-1851), físico y químico danés, que demostró la existencia de un campo magnético en torno a una corriente eléctrica.*

El campo magnético tiene propiedades diferentes al eléctrico. El magnético se crea por la presencia de una carga eléctrica; el eléctrico sólo existe cuando hay una corriente eléctrica, es decir, cargas en movimiento. Lo anterior se refleja en la distinta naturaleza de las líneas de uno y otro campo.

Si comparamos las del campo eléctrico, como aquellas que se ven en la figura 3, con las del campo magnético, como se muestran en la figura 8, vemos que en las primeras existen puntos de convergencia donde todo se origina, mientras que las del campo magnético no tienen principio ni fin. En un caso existe la fuente del campo —que es la carga eléctrica— y en el otro no: el análogo de esta fuente no se ha encontrado.

I.15-Teoría electromagnética

Hans Christian Oersted descubrió que una aguja magnética podía ser desviada por una corriente eléctrica.

Este descubrimiento, que mostraba una conexión entre la electricidad y el magnetismo, fue desarrollado por **Ampere,* que estudió las fuerzas entre cables por los que circulan corrientes eléctricas, y por ***Arago*, que magnetizó un pedazo de hierro colocándolo cerca de un cable recorrido por una corriente. *Faraday* descubrió que el movimiento de un imán en las proximidades de un cable induce en éste una corriente eléctrica; este efecto era inverso al hallado por *Oersted*.

**André Marie Ampère (1775-1836), científico francés, conocido por sus importantes aportaciones al estudio de la electrodinámica. El amperio (A), la unidad de intensidad de corriente eléctrica, toma su nombre de él. Su teoría electrodinámica y sus interpretaciones sobre la relación entre electricidad y magnetismo se publicaron en su Colección de observaciones sobre electrodinámica (1822) y en su Teoría de los fenómenos electrodinámicos (1826)*

***Dominique François Jean Arago (1786-1853), astrónomo y físico francés, que descubrió el fenómeno conocido como magnetismo de rotación y demostró la relación entre la aurora y las variaciones en el magnetismo terrestre.*

Así, *Oersted* demostró que una corriente eléctrica crea un campo magnético, mientras que *Faraday* demostró que puede emplearse un campo magnético para crear una corriente eléctrica. La unificación de las teorías de la electricidad y el magnetismo se debió a *Maxwell,* que predijo la existencia de ondas electromagnéticas e identificó la luz como un fenómeno electromagnético.

Los estudios posteriores se centraron en la comprensión del origen atómico y molecular de las propiedades magnéticas de la materia. **Langevin* desarrolló una teoría sobre la variación con la temperatura de las propiedades magnéticas de las sustancias paramagnéticas, basada en la estructura atómica de la materia. Esta teoría es un ejemplo de la descripción de propiedades macroscópicas a partir de las propiedades de los electrones y los átomos. (*Gil DJ. 1988*) La teoría de ***Neils Bohr* sobre la estructura atómica, hizo que se comprendiera la tabla periódica y mostró por qué el magnetismo aparece en los elementos de transición como el hierro o los ****lantánidos* o en compuestos que incluyen estos elementos. *****Samuel Abraham Goudsmit* y ******Uhlenbeck* demostraron que los electrones tienen espín y se comportan como pequeños imanes con un *momento magnético* definido.

** Paul Langevin (1872 - 1946) es un físico francés, conocido por su teoría del magnetismo.*

***Niels Bohr (1885-1962), físico danés, galardonado con el Premio Nobel, que hizo aportaciones fundamentales en el campo de la física nuclear y en el de la estructura atómica.*

****Lantánidos, grupo de elementos químicos del sistema periódico conocidos también como tierras raras*

*****Goudsmit, Samuel Abraham (1902-1978). Físico holandés. Junto con Uhlenbeck, puso de manifiesto la existencia del espín electrónico o giro que los electrones del átomo efectúan sobre sí mismos*

******George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) fue un físico teórico holandés-estadounidense. El introdujo el concepto del spin, que postula que los electrones giran sobre un eje..*

El momento magnético de un objeto es una cantidad vectorial que expresa la intensidad y orientación del campo magnético del objeto. **Werner Karl Heisenberg* dio una explicación detallada del campo molecular de ***Weiss* basada en la ****mecánica cuántica.*

I.16-Tipos de materiales magnéticos

Las propiedades magnéticas de los materiales se clasifican siguiendo distintos criterios. Una de las clasificaciones de los materiales magnéticos (diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos) se basa en la reacción del material ante un campo magnético. Cuando se coloca un material diamagnético en un campo magnético, se induce en él un *****momento magnético* de sentido opuesto al campo magnético. En la actualidad se sabe que esta propiedad se debe a las corrientes eléctricas inducidas en los átomos y moléculas individuales [93]. Estas corrientes producen momentos magnéticos opuestos al campo aplicado. Muchos materiales son diamagnéticos; los que presentan un diamagnetismo más intenso son el bismuto metálico y las moléculas orgánicas que, como el benceno, tienen una estructura cíclica, que permite que las corrientes eléctricas se establezcan con facilidad.

**Werner Karl Heisenberg (1901-1976), físico y Premio Nobel alemán, que desarrolló un sistema de mecánica cuántica y cuya indeterminación o principio de incertidumbre ha ejercido una profunda influencia en la física y en la filosofía del siglo XX.*

***Weiss, Pierre Ernst (1865-1940). Físico francés. Sus trabajos de investigación versaron principalmente sobre el paramagnetismo y el ferromagnetismo. Descubrió el fenómeno magnetocalórico y formuló la teoría del magnetón o momento magnético elemental*

****mecánica cuántica, Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), físico alemán, premiado con el Nóbel, considerado el creador de la teoría cuántica llegó a la conclusión de que la radiación electromagnética se emite en unidades discretas de energía, llamadas cuantos. Avanzando en el desarrollo de esta teoría, descubrió una constante de naturaleza universal que se conoce como la constante de Planck*

*****En física, el momento magnético de un elemento puntual es un vector que, en presencia de un campo magnético (inherentemente vectorial), se relaciona con el torque de alineación de ambos vectores en el punto en el que se sitúa el elemento. El vector de campo magnético a utilizarse es el B denominado como Inducción Magnética o Densidad de Flujo Magnético cuya magnitud es el Weber por metro cuadrado.*

El comportamiento paramagnético se produce cuando el campo magnético aplicado alinea todos los momentos magnéticos ya existentes en los átomos o moléculas individuales que componen el material. El paramagnetismo en sustancias no metálicas suele caracterizarse por una dependencia de la temperatura: la intensidad del momento magnético inducido varía inversamente con la temperatura. Esto se debe a que al aumentar la temperatura, cada vez resulta más difícil alinear los momentos magnéticos de los átomos individuales en la dirección del campo magnético. Las sustancias ferromagnéticas son las que, como el hierro, mantienen un momento magnético incluso cuando el campo magnético externo se hace nulo. Este efecto se debe a una fuerte interacción entre los momentos magnéticos de los átomos o electrones individuales de la sustancia magnética, que los hace alinearse de forma paralela entre sí.

I.16-Espín

El espín (del inglés *spin* "giro, girar") se refiere a una propiedad física de las partículas subatómicas, por la cual toda partícula elemental tiene un **momento angula*r intrínseco de valor fijo. Se trata de una propiedad intrínseca de la partícula como lo es la masa o la carga eléctrica.

**Momento angular o momento cinético es una magnitud física importante en todas las teorías físicas de la mecánica, Su importancia se debe a que está relacionada con las simetrías rotacionales de los sistemas físicos.*

El espín fue introducido en 1925 por **Ralph Kronig* e, independientemente, por ***George Uhlenbeck* y ****Samuel Goudsmit.*

En 1920, los químicos analíticos llegaron a la conclusión que para describir a los electrones en el átomo, además de los números cuánticos, se requería de un cuarto concepto, el llamado espín del electrón.

Éste, al girar sobre su propio eje genera un campo magnético, el denominado espín. Los dos físicos, *Goudsmit y Uhlenbeck*, descubrieron que, si bien la teoría cuántica de la época no podía explicar algunas propiedades de los espectros atómicos, añadiendo un número cuántico adicional, *el espín*, se lograba dar una explicación más completa de los espectros atómicos. Pronto, el concepto de espín se amplió a todas las partículas subatómicas, incluidos los protones, los neutrones y las antipartículas. El espín proporciona una medida del momento angular y de la acción, intrínseco de toda partícula. Todo esto en contraste con la mecánica clásica, donde el momento angular se asocia a la rotación de un objeto extenso.

El espín es un fenómeno exclusivamente cuántico. En las teorías cuánticas no relativistas el espín debe introducirse de manera artificial, mientras que en las relativistas aparece de manera natural.

**Ralph Kronig (1904-1995) Físico germano americano.Se oce como el descubridor de el spin de las partículas y por su teoría de la espectroscopia de la absorción de los rayos X.*

***George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) fue un físico teórico neerlandés-estadounidense. El introdujo el concepto del spin, que postula que los electrones giran sobre un eje.*

****Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978) Físico estadounidense de origen holandes. Junto con Uhlenbeck, puso de manifiesto la existencia del espín electrónico o giro que los electrones del átomo efectúan sobre sí mismos LLevó a cabo diversas investigaciones sobre transmisiones electrónicas y sobre física nuclear.*

Propiedades del espín:

Como propiedad mecánico-cuántica, el espín presenta una serie de cualidades que lo distinguen del momento angular clásico:

- En primer lugar el valor de espín está cuantificado, lo que significa que no pueden encontrarse partículas con cualquier valor del espín, sino que el espín de una partícula siempre es un múltiplo entero de $\hbar/2$ (donde $\hbar$ es la constante de *Planck* dividida entre 2π, también llamada *constante de *Dirac*).
- En segundo lugar, cuando se realiza una medición del espín en diferentes direcciones, sólo existen dos posibles valores iguales y de signo contrario, que son sus posibles proyecciones sobre una dirección predeterminada.
- En tercer lugar, la magnitud del espín, independiente de la dirección, es única para cada tipo de partícula elemental. Esto contrasta con el caso clásico donde el momento angular de un cuerpo alrededor de su eje puede asumir diferentes valores según la rotación sea más rápida o menos.

II- Física del sistema nervioso

La variedad de comportamientos en los seres vivos es casi infinita, desde el caminar de la oruga, el apareamiento de la abeja reina o la caza del león. Y en ninguna especie la conducta es tan variada como en la especie humana. Todos estos comportamientos, desde un parpadeo hasta escribir un libro de filosofía, son fruto del sistema nervioso.

**Paul Adrien Maurice Dirac,(1902-1984) físico teórico británico que contribuyó de forma fundamental al desarrollo de la mecánica cuántica y la electrodinámica cuántica.*

El sistema nervioso recoge información sobre el mundo exterior y también sobre el estado del propio organismo, analiza y compara esta información, decide cuál es la respuesta adecuada en cada momento y la ejecuta, almacena la información para uso futuro y planea la estrategia a largo plazo. El sistema nervioso está formado por células, como todo el resto del organismo. Sin embargo, existe una diferencia; en otros órganos cada célula realiza, en pequeño, la función del órgano, y la suma de las actividades de todas las células produce la actividad total del órgano. Por ejemplo cada célula muscular es capaz de contraerse y, la suma de todas las contracciones de todas las células es la que produce la contracción del músculo. En cambio, una célula nerviosa por sí sola no produce pensamiento o conducta, únicamente recibe y transmite señales eléctricas y, solo por la interconexión y coordinación de todas las neuronas se produce la actividad del sistema nervioso. Es por eso que la función del sistema nervioso es una propiedad emergente, es decir un fenómeno que no se podría predecir examinando el funcionamiento de cada uno de sus componentes por separado.

La función del sistema nervioso se puede reducir en esencia a la transmisión de señales, mediante la cual un estímulo produce una respuesta. Por ejemplo, cuando vemos un pastel apetitoso (el estímulo), los ojos envían señales al cerebro, y este envía señales a los músculos de las manos para cogerlo y llevárselo a la boca (la respuesta). En último extremo, todo el comportamiento humano podría reducirse a cadenas, más o menos complicadas de estímulos y respuestas. Las células que forman el sistema nervioso, o neuronas, son células especializadas en recibir y enviar señales y tienen múltiples prolongaciones por las que entran y salen estas señales. Algunas de estas prolongaciones pueden ser muy largas, por ejemplo, la neurona que envía las órdenes a los músculos del pie están en la parte baja de la columna vertebral, así que la prolongación que transmite esas órdenes mide aproximadamente un metro, que es la distancia entre la columna vertebral y el pie (en una

ballena las fibras que llevan las órdenes a los músculos de la cola son casi tan largas como la misma ballena, es decir, más de 20 metros). Una neurona, por tanto, está continuamente recibiendo y enviando señales, como una central telefónica. Esas señales de las neuronas se denominan *potenciales de acción*, y como en el caso de la central telefónica, son de naturaleza eléctrica. Sin embargo, las fibras o prolongaciones de las neuronas no están hechas de cobre, como los cables telefónicos, sino del material de la propia célula. Este material no conduce la electricidad tan bien como un cable, de modo que la neurona ha tenido que encontrar una manera propia de propagar las señales sin que pierdan potencia. Todas las células tienen una carga eléctrica negativa en su interior. Esta carga eléctrica se debe a la diferencia de concentración de sales entre el interior de la célula y el exterior de la misma, y el proceso es lejanamente parecido al que se produce en una pila, como las que ponemos en la radio. En la pila, hay en su interior una solución de sales, estas sales reaccionan con el metal de la cubierta, y esto produce el movimiento de cargas eléctricas que alimenta a la radio cuando la encendemos. En el caso de la célula, el potasio que hay en su interior tiende a salir de la célula (porque está más concentrado dentro que fuera, y tiende a moverse a donde la concentración es menor), pero como el potasio tiene carga eléctrica positiva esto deja el interior de la célula con un exceso de cargas negativas. Este movimiento de cargas produce un voltaje o diferencia de potencial, igual que el que se produce entre los polos de una pila pero unas 20 veces menor [94]. Esta carga eléctrica existe en todas las células, pero además, algunas células han desarrollado la capacidad de usar la carga eléctrica para transmitir señales. Esas células se denominan excitables, son las únicas que pueden producir potenciales de acción (PA), e incluyen fundamentalmente a las células nerviosas y a las musculares. El potencial de acción es como un cortocircuito de la membrana. Si en una pila conectamos el polo positivo con el negativo, la pila se descarga y desaparece la diferencia de potencial entre los polos.

En la membrana de las células excitables sucede algo parecido, durante el potencial de acción se abren canales en la membrana que permiten el paso de corriente, de manera que entran cargas positivas, y neutralizan la carga negativa en el interior, con lo que la diferencia de potencial que había en reposo desaparece.

Esas cargas se propagan al siguiente segmento de la membrana, y de este al siguiente, por lo que el cortocircuito, es decir, el potencial de acción, se propaga con mucha rapidez a lo largo de la fibra nerviosa (figura 9). En un tiempo muy corto (una milésima de segundo) los canales se cierran, la carga negativa reaparece, y la fibra queda en situación de enviar otra señal. Los primeros estudios sobre el papel de la electricidad en la conducción nerviosa los realizó en 1791 *Luigi Galvani*, profesor de Anatomía en la Universidad de Bolonia, Italia. Galvani encontró que cuando ponía en contacto el músculo de la pata de una rana con el nervio correspondiente, el músculo se contraía, por lo que supuso que en la preparación se producía electricidad, que era conducida por el nervio y que hacía contraerse al músculo, a la que llamó *electricidad animal*.

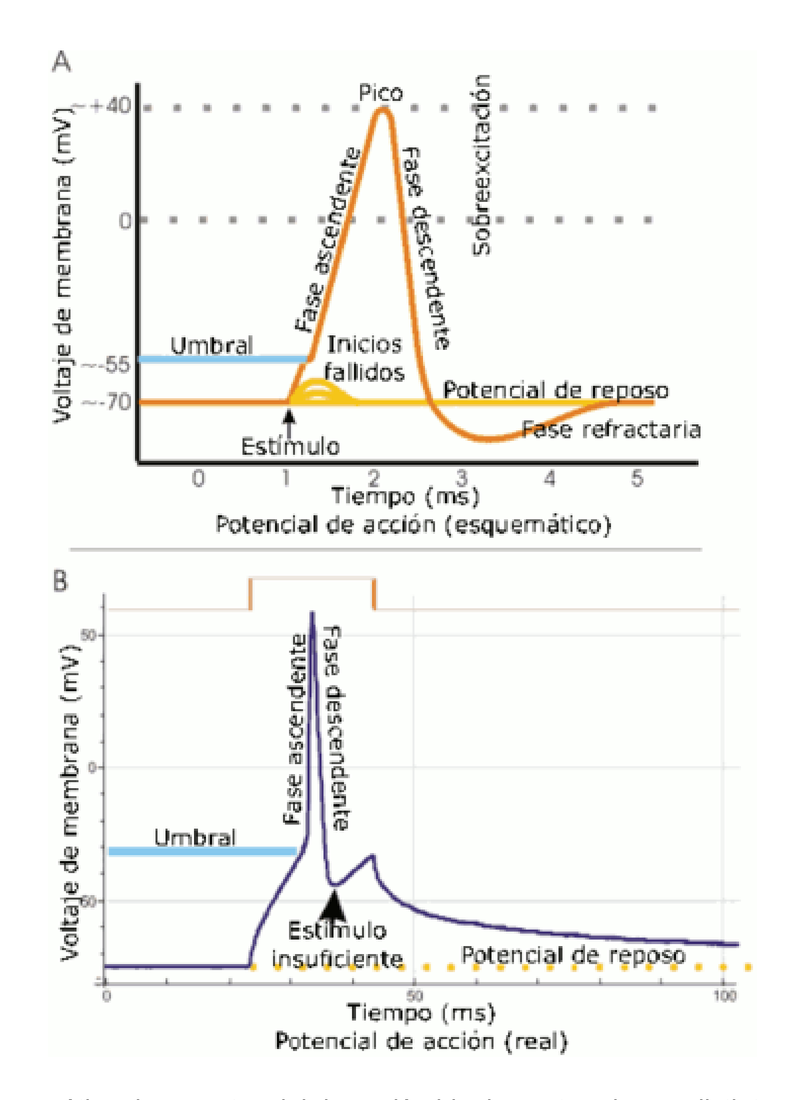


*Figura 9- **A-** Vista esquemática de un potencial de acción ideal, mostrando sus distintas fases. **B-** Registro real de un potencial de acción, normalmente deformado, comparado con el esquema debido a las técnicas electrofisiológicas utilizadas en la medición.*

En 1792 el físico de **Pavía Alessandro Volta* criticó la interpretación de Galvani.

**Pavía Alessandro Volta (1745-1827), físico italiano, conocido por sus trabajos sobre la electricidad. Hacia 1800 había desarrollado la llamada pila de Volta, precursora de la batería eléctrica, que producía un flujo estable de electricidad. Por su trabajo en el campo de la electricidad. La unidad eléctrica conocida como voltio recibió ese nombre en su honor.*

Según Volta, los nervios y los músculos podían responder a la electricidad, pero no la producían por sí mismos y en los experimentos de Galvani, la electricidad no se había producido en el nervio o en el músculo, sino en los metales que había utilizado para ponerlos en contacto (figura 10)

(Volta había demostrado que se generaba electricidad cuando se ponían en contacto dos metales de distinta clase y, ese es el principio de la llamada pila de Volta) [95].

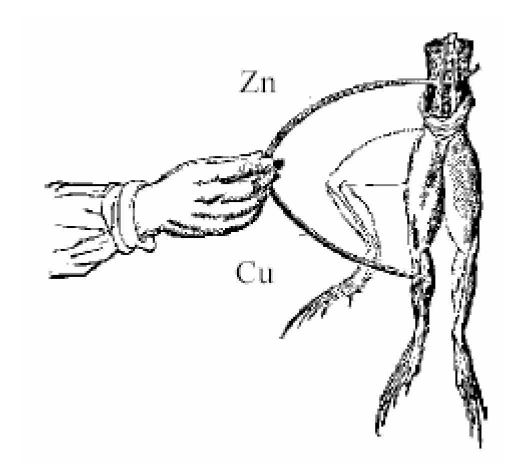


Figura 10- Experimento de estimulación de Luigi Galvani. La actividad electroquímica de dos metales distintos (zinc y cobre) formando un arco bimetálico en contacto con el electrolito del tejido producía una corriente eléctrica de estimulación que originaba la contracción muscular.

Posteriormente, Galvani confirmó su teoría porque repitió los experimentos sin utilizar metales y obtuvo los mismos resultados. Hoy sabemos que efectivamente los nervios producen corrientes eléctricas, que es lo que denominamos potencial de acción [96]. Sin embargo, en su época casi todo el mundo siguió la interpretación de Volta, y a Galvani no se le hizo caso hasta mucho después de su muerte. Volta intervenía en la política y era un personaje importante, mientras que a Galvani no le conocía casi nadie. Aunque se supone que los científicos deben ser objetivos al enjuiciar los méritos de una teoría, a veces no sucede así, como en este caso.

De lo expuesto hasta aquí es lógico inferir que el sistema nervioso es la parte más complicada del cuerpo humano, su funcionamiento aún no se conoce completamente, sin embargo, ya se sabe que de él depende la mayor parte del trabajo del cuerpo. *El sistema*

nervioso puede ser dividido en dos partes de acuerdo a sus características anatómicas: el *central* (SNC) y el *periférico* (SNP) [97]. El sistema nervioso central está compuesto por el cerebro, cerebelo, diencéfalo, tallo cerebral y medula espinal; comúnmente se dice que lo forman el encéfalo y la médula espinal; está protegido por los huesos que forman el cráneo y la columna vertebral y, su función es interpretar y procesar la información que recibe principalmente del exterior en forma de estímulos eléctricos, para luego enviar la información requerida, también en forma de estímulos eléctricos, al lugar adecuado del cuerpo. Por ejemplo, si se recibe un chispazo muy luminoso, la información llega al cerebro por medio del nervio óptico y el cerebro manda la orden de cerrar los ojos; si se aspira polvo en una cantidad que provoca irritación en las mucosas, la orden del cerebro es que se estornude o se tosa, etc. La información que llega a él también puede provenir del interior del cuerpo. Por ejemplo, cuando nos duele el estómago por exceso de comida, el cerebro nos puede ordenar el deseo de ya no ingerir más alimento; si hay una infección presente, puede ordenar que se eleve la temperatura del cuerpo para ayudar a combatirla, etc. Pero aún es más complejo pues puede evocar recuerdos que nos hacen sonreír o llorar, recordar un dato que necesitamos, etc.

El sistema nervioso periférico está compuesto por los nervios que se encuentran fuera del SNC, se divide en dos partes: el *sistema nervioso somático*, que controla las funciones voluntarias, como por ejemplo el caminar hacia un lugar específico, escribir, etc., y el *sistema nervioso autónomo ó vegetativo* (figura 11) que es el que controla las funciones involuntarias como son la digestión, respiración, deglución etc [98].

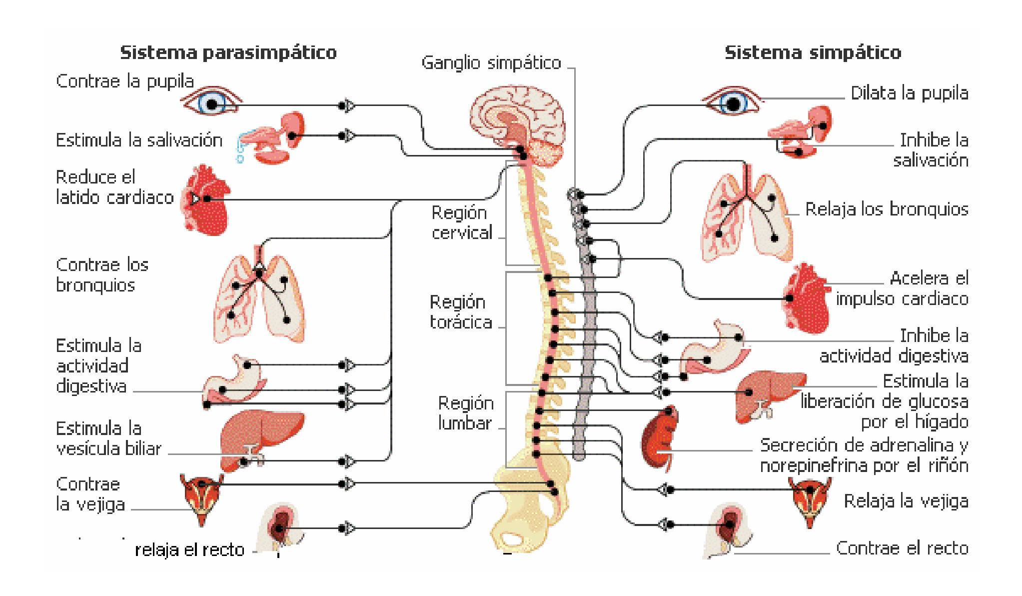


Figura 11- Sistema nervioso autónomo o vegetativo. El sistema nervioso autónomo dirige las actividades corporales sobre las que el individuo no tiene un control consciente, como la respiración o la digestión. Consta de dos partes: el sistema simpático y el parasimpático.

Las células que constituyen el sistema nervioso, llamadas fibras nerviosas o simplemente neuronas están formadas por un cuerpo celular o soma que rodea a una región conocida como núcleo, el cuerpo celular tiene varias ramificaciones o dendritas que adquieren información de las neuronas adjuntas a través de las uniones sinápticas. Al proceso del paso de la información de una neurona a otra se le conoce como *sinapsis*. Esta información se transmite por la neurona a través del soma hasta llegar a una extensión llamada axón, la cual se ramifica a su vez en varias terminales que conforman otras uniones sinápticas trasmitiendo la información a una o varias neuronas o bien a fibras musculares, como se muestra en la figura 12, formando así una red enormemente compleja. El cerebro humano adulto pesa aproximadamente 1350g y contiene unos diez mil millones de neuronas y cientos de miles de otras células. Las neuronas del cuerpo humano son de dos tipos diferentes: unas llamadas mielinizadas están cubiertas por una sustancia grasa, la mielina, que se encuentra distribuida en el axón por tramos separados por pequeñas distancias no cubiertas llamadas nodos de Ranvier; otras, no cubiertas por mielina, se llaman no mielinizadas ó amielínicas [99].

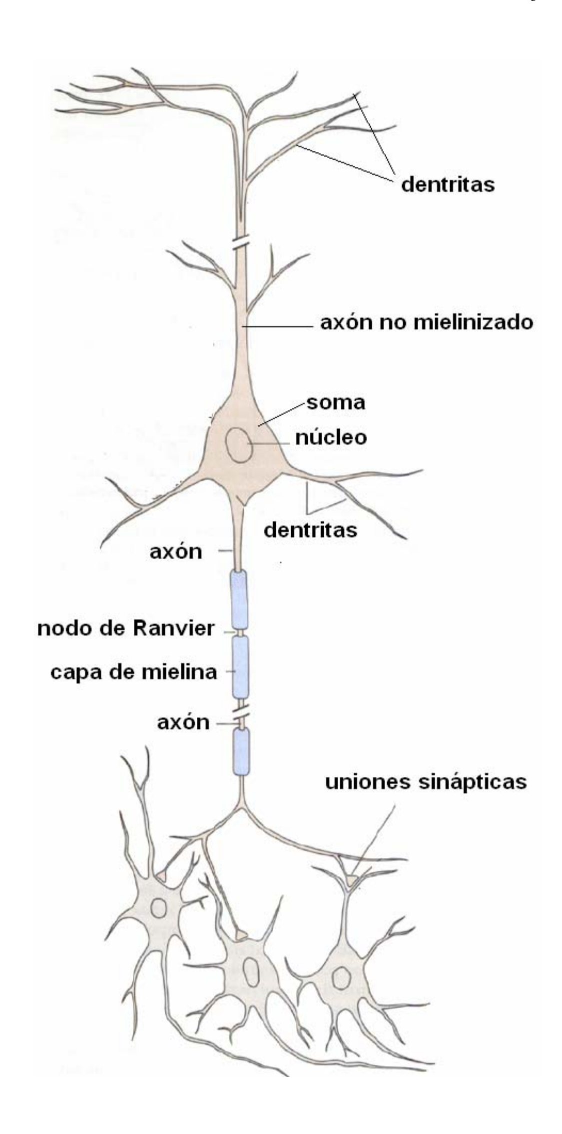


Figura 12- Las neuronas son las células que forman el sistema nervioso, las hay mielinizadas y no mielinizadas.

La velocidad de transmisión de la información depende del tipo de neurona y del grueso de ésta. Las neuronas mielinizadas trasmiten a mayor velocidad que las no mielinizadas, (figura 13) además, mientras mayor sea el diámetro del axón, mayor será la velocidad de la transmisión. Un axón no mielinizado de aproximadamente 1mm de diámetro trasmite la información con velocidades entre 20 y 50 m/s, mientras que uno mielinizado de aproximadamente 1μ (milésima parte de milímetro) la transmite con una velocidad cercana a los 100 m/s.

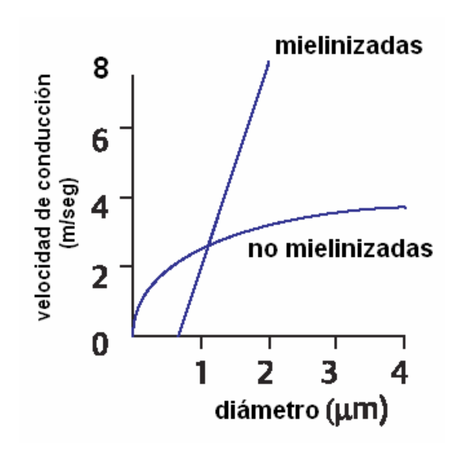


Figura 13- Diferencia de velocidades de conducción entre las neuronas mielinizadas y amielínicas

La mayor parte de las neuronas en el cuerpo humano son mielinizadas y algunas tienen axones que llegan a medir más de un metro, por ejemplo aquellas que producen el movimiento de los dedos del pie, pues sus cuerpos celulares se encuentran en la médula espinal. El mecanismo por el cual se trasmite la información es excesivamente complejo, aquí nos limitaremos exclusivamente a los fenómenos eléctricos, pero es preciso señalar que la forma fundamental de la actividad nerviosa es de carácter bioquímico.

II.1-La conducción del impulso nervioso

Lo que hoy conocemos como excitabilidad, corrientes iónicas, conductancias, etc., fue iniciado, muy a principios de la década de los 50, por la conjunción de:

1) el axón del calamar (figura 14) que, por su gran diámetro, permitió la introducción, por un extremo, de pipetas y electrodos.

2) la técnica de voltaje controlado o, en inglés, "*voltage-clamp*", que permitió mantener el potencial del axón fijo en un valor deseado;

3) el ingenio de **Hodgkin,* ***Huxley,* ****Katz* y el grupo del Laboratorio de Fisiología de la Universidad de Cambridge, en Inglaterra. Los tejidos excitables (músculo y nervio), son capaces de generar un potencial de acción (PA) en respuesta a un estimulo.[100]

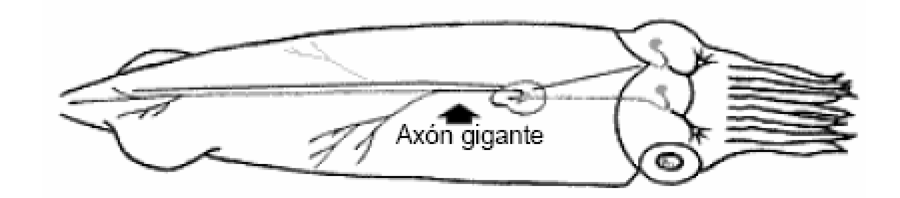


Figura 14-Axón del calamar

Para establecer un orden lógico del análisis de los fenómenos que se ven asociados a la generación de un PA en respuesta a un estímulo, viajar por las fibras nerviosas y saltar las sinapsis tendríamos que comenzar por realizar las siguientes preguntas ¿Para conducir una señal es realmente necesario un mecanismo tan complicado como el potencial de acción? ¿No seria más sencillo enviar las señales generando una diferencia de potencial en un extremo de un cable conductor y registrarla en el otro, como en los hilos de un telégrafo?. Imaginemos que, como muestra la figura 15, un cable metálico, grueso, corto y de baja resistencia en donde, en un extremo, por medio de los electrodos 1 y 2, se crea una diferencia de potencial transitoria, un pulso cuadrado.

**Alan Lloyd Hodgkin (1914-1998), biofísico y premio Nóbel británico. Investigó en la transmisión de los impulsos nerviosos a lo largo de las fibras nerviosas*

***Andrew Fielding Huxley (1917-), biofísico y premio Nóbel británico. Huxley y Hodgkin fueron nominados por la formulación matemática que expresa los eventos eléctricos que acompañan a la descarga de una única célula nerviosa.*

****Bernard Katz (1911-2003), biofísico británico de origen alemán. Obtuvo el Premio Nóbel 1970 por sus descubrimientos sobre los neurotransmisores, sustancias químicas que estimulan las células nerviosas o musculares.*

Si el pulso es "positivo", durante el tiempo **t** el extremo izquierdo del cable será (+) y el extremo derecho se comportara como (-). En esas condiciones habrá un flujo de cargas, una corriente eléctrica que viajará hacia los electrodos 3 y 4.

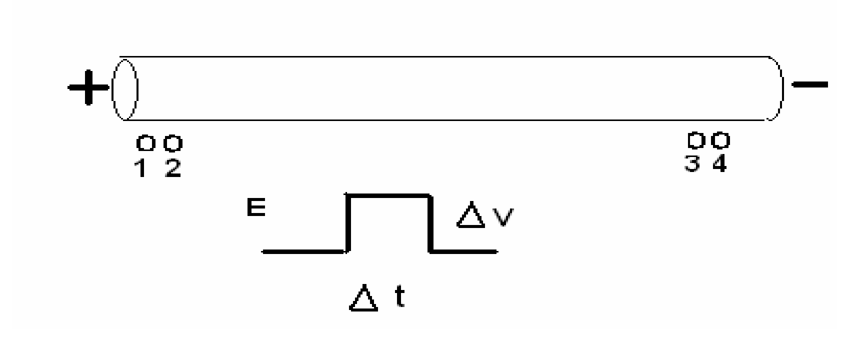


Figura 15- En condiciones ideales, en un conductor metálico (corto, grueso, de baja resistencia)

Si conectamos estos electrodos a un osciloscopio veremos la llegada del pulso cuadrado con prácticamente las mismas características de voltaje y duración. Si el conductor fuera de alta resistencia, o delgado, o largo, o sumergido en una solución conductora, las cosas serian diferentes: la amplitud o voltaje de la señal iría disminuyendo con la distancia entre los electrodos que generan la señal y los que la registran (figura 16), hasta desaparecer totalmente. Recordemos que la resistencia **R** de un conductor es:

$$R = \rho \cdot \frac{Longitud}{Área}$$

donde ρ es la resistencia específica, la que depende del material del conductor, **l** es la longitud y **A** es el área de sección transversal, se puede ver que la **R** aumenta con la longitud y como la intensidad **i** es

$$i = \frac{\Delta V}{R}$$

al aumentar **R**, la intensidad disminuye y la señal puede llegar a ser no detectable.

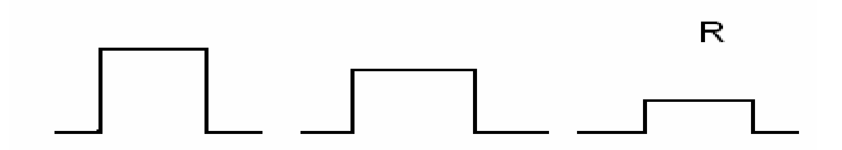


Figura 16- El conductor es largo, delgado o de alta resistencia.

II.2-Los axones como conductores

Las cosas se complican cuando se analiza el comportamiento de los axones como simples conductores**.** Colocando un axón en iguales condiciones a los de la figura 15, el viaje del pulso cuadrado es parecido al que ocurre en un cable con resistencia, existiendo un decremento con la distancia. Sin embargo, la forma del pulso registrado es algo diferente (figura 17); nótese que el pulso generador sube a su máximo y vuelve a cero en forma casi instantánea mientras que en su registro se ve que sube y baja más lentamente.

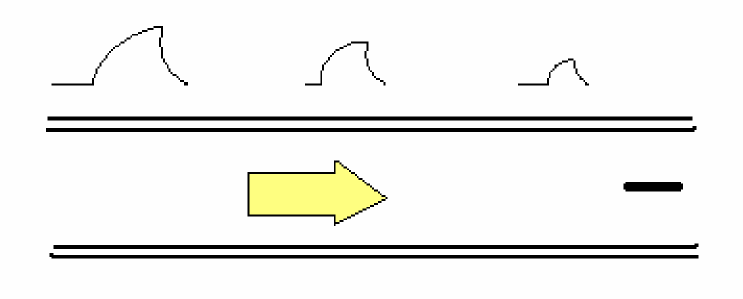


Figura 17 -En un axón el estimulo se propaga a cortas distancias con un ascenso y descenso del potencial característico de los conductores con capacitancias.

Esto es debido a que en las membranas biológicas hay elementos que se comportan como capacitores, requiriendo un tiempo para cargarse y descargarse.

La capacitancia **C** de un capacito es

$$C = \frac{q}{V}$$

lo que puede interpretarse expresando que la capacitancia de un capacito esta dada por la cantidad de cargas **q** que necesita para alcanzar un cierto voltaje **V.** Por los cables circulará una cierta corriente **i** mientras el capacito se esta cargando.

Como

$i = \frac{q}{t}$ la cantidad de cargas **q** será: $q = i.\ t$

y el tiempo necesario para cargarse y alcanzar el voltaje de la fuente, será de:

$C = i.\ t\ /\ V$ y $t = C.\ V\ /\ i$

Y si $i = V\ /\ R$ quedará: *tiempo* $t = C\ .\ R$

Lo que puede interpretarse expresando que el tiempo que tarda un capacito en llegar al voltaje de la fuente es directamente proporcional a la capacitancia y a la resistencia que haya en el circuito. Sin embargo, el capacito no llega a su voltaje en forma lineal sino que su carga es una función exponencial del tiempo, de acuerdo a la ecuación:

$$V = V_{max}\ (1 - e^{-t\ .\ RC})$$

y cada circuito tiene su *constante de tiempo* que se define como el tiempo necesario para alcanzar 1/e del valor del voltaje máximo. Aclaremos: supongamos que el voltaje a alcanzar sea de 0,1 volt. Como e = 2,73, se calcula: 0,1 V / 2,73 = 0,037 V. En los axones, la constante de tiempo varía entre 1 y 10 milisegundos (ms). A voltaje constante se puede suponer que cuanto más bajo sea el valor, en ohms, de la resistencia y cuanto menor sea el valor, en Faraday, del capacito, más rápida será la carga del capacito y menor la constante de tiempo [101].

II.3-El modelo del axón como conductor con capacitancia y resistencia

El axón no es un cable ni un conductor metálico sino un tubo formado por la membrana celular, una solución conductora en el interior formada por agua y electrolitos, principalmente potasio **K+** y por otra solución electrolítica, con sodio **Na+** en la mayor concentración, en el exterior. En la figura 18 esta representado un axón con 3 resistencias y 1 capacito. **Ri** es la resistencia interna, la del interior celular, **Rm** es la resistencia de membrana, **Cm** es la capacitancia de la membrana y **Ro** es la resistencia externa.

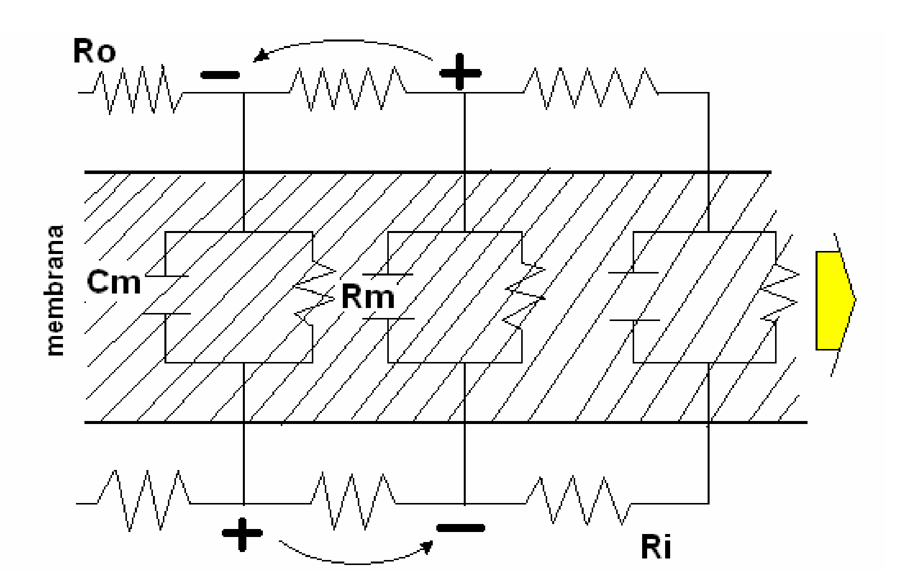


Figura 18-La membrana de un axón representada por una serie de resistencias externas (Ro) y resistencias internas (Ri) que conectan los circuitos RC. La propagación se hará por el movimiento de cargas positivas en el interior y el exterior de la membrana.

¿Qué pasa si en un extremo se crea, como hicimos con el cable, una diferencia de potencial? Por las resistencias circulará una corriente que irá cargando el capacito. El valor del potencial con que se cargue el capacito dependerá de las caídas de potencial que haya habido en el camino y de allí que el potencial registrado vaya disminuyendo a medida que nos alejamos de la señal generadora.

Se conoce como *constante de espacio* la distancia que puede recorrer la señal antes de alcanzar 1/e del valor de voltaje original. Si el pulso es de 0,1 V y alcanza 0,1 V. 1/e = 0,1/2,73 = 0,037 V a los 2 cm de los electrodos, se dirá que la constante de espacio de ese axón es de 2 cm

II.4-Los potenciales y las corrientes electrotónicas

Estimada de esta manera una fibra nerviosa por sus más simples propiedades, puede ser considerada un conductor, con sus resistencias y capacitancias. ¿Es un buen conductor? Sus propiedades como conductor son buenas, pero es demasiado largo para tan poco diámetro, tendría que ser más gruesa ya que su constante de espacio es del orden de los milímetros. De ese modo, con pulsos del orden de los 100 milivoltios la señal sólo podría viajar unos pocos milímetros. ¿Qué solución habría?: a) Aumentar el voltaje de la señal. Si una estructura nerviosa fuera capaz de generar cientos de voltios, aún con las características pasivas de las fibras nerviosas, se podría enviar la información desde una pierna al cerebro y viceversa. Como los potenciales biológicos se generan por flujo de iones, se necesitarían gradientes miles de veces superiores a los existentes b) aumentar el diámetro de las fibras para disminuir **Ri**; serian necesarios nervios de varios centímetros de diámetro (y enormes piernas y brazos para alojarlos) La solución está en los potenciales de acción y los canales voltaje-dependientes. En la membrana hay estaciones de relevo, fuentes de energía, que van generando un nuevo potencial de acción cuando les llega un potencial de acción. De ese modo la conducción es *no decremental.* Hay, sin embargo,

situaciones fisiológicas en las que la conducción se hace como en un conductor, sin PA. Si la señal sólo generó un potencial subumbral, no hay aparición de PA y el potencial se propaga *electrotónicamente*, con una *corriente local*; a los pocos milímetros ya no es posible registrar el potencial. En los axones los estímulos hiperpolarizantes, al no generar nunca un PA, son siempre potenciales electrotónicos. [101]

Como hemos visto hasta aquí, el fenómeno eléctrico en la trasmisión de la información es a través de una diferencia de potencial debido a que en la parte externa hay más iones positivos que en la parte interna; se dice que la neurona está polarizada. Esta diferencia de potencial es de 60 a 90 mV y se conoce como *potencial de restauración o restitución*.

Para estimular la neurona es necesario producir un cambio momentáneo en el potencial de restitución, hay un límite inferior capaz de producir este cambio al que se conoce como *umbral* de la neurona y puede ser diferente dependiendo del lugar donde se encuentre y de la persona, por eso es que sentimos más fuerte un mismo golpe en la mejilla que en la palma de la mano y que una persona sea más sensible que otra. Cuando la fibra nerviosa es mielinada, el potencial de acción decrece en tamaño en la región donde hay mielina hasta llegar al siguiente nodo de Ranvier, donde actúa como un estímulo restaurando el potencial de acción a su forma y medida original, por lo que parece como si brincara de nodo a nodo.

El estudio del cerebro es mucho más complicado de entender que la transmisión de señales eléctricas a través del axón, pues se trata de una compleja maraña de neuronas interconectadas de tal forma que el cerebro maneja toda la información que recibe desde antes de que ocurra el nacimiento, hasta la muerte de la persona. Sin embargo, la parte del cerebro más desarrollada en el hombre es la corteza o estructura externa, que le ha permitido dominar a todas las demás especies.

En 1838, Carlo Matteucci (1811-1865) fue el primero en detectar una señal bioeléctrica [102], midiendo el impulso muscular en un músculo de rana. Sus experimentos los repitió en 1841 Emil du Bois-Reymond, quien utilizando una instrumentación mejor fue capaz de medir la corriente asociada al impulso muscular [103]. Su mejorada técnica experimental la aprovechó Richard Caton (1842-1926) para medir la actividad eléctrica del cerebro de conejos y monos. Se considera que los primeros informes de Caton [104] sobre sus experimentos que fueron publicados en 1875 constituyen el descubrimiento del *electroencefalograma* (EEG). Posteriormente, en 1888 el científico Adolf Beck [105] demostró con éxito que el impulso eléctrico se propagaba a lo largo de la fibra nerviosa sin atenuarse.

Los trabajos de Beck corroboraron de forma independiente las conclusiones de Caton. Sin embargo, no sería hasta 1924 cuando Hans Berger (1873-1941) logró el primer registro de EEG de un humano, identificando los dos ritmos principales [106]

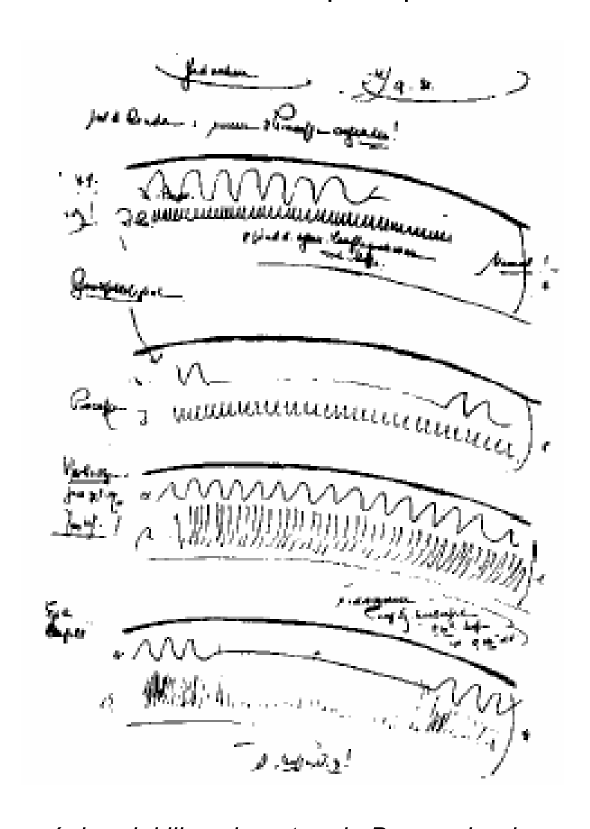


Figura 16-Reproducción de una página del libro de notas de Berger donde muestra los primeros registros de EEG de un humano.

Para hacer el registro de las señales se usan unos discos pequeños de plata con una cubierta de cloruro de plata, llamados electrodos, que son colocados en los lugares del cerebro que se desean estudiar usando una pasta adhesiva conductora que ayuda al paso de la señal hacia el electrodo, el cual la lleva a un amplificador.

Para el registro de una señal se necesitan al menos dos electrodos; cada uno mide un potencial. Frecuentemente el potencial de referencia es el de un electrodo colocado en el lóbulo de la oreja, debido a que es un punto con poca actividad eléctrica. El EEG resulta de la diferencia entre estos dos potenciales, realmente no es otra cosa que la gráfica de cómo varía el voltaje con respecto al tiempo.

El EEG obtenido de electrodos en la superficie de la cabeza, se compone por ondas rítmicas lentas cuyo tamaño puede variar entre 10 y 100 microvolts (esto se conoce como amplitud del pulso); estas ondas varían en forma, amplitud y frecuencia (número de pulsos emitidos por segundo, su unidad es el Hertz: Hz). Cuando la frecuencia está entre 8 y 12 Hz se conoce como ritmo alfa y se originan preponderantemente en el lóbulo occipital durante períodos de relajación, con los ojos cerrados, pero todavía despierto. Cuando la persona está más alerta, el valor de la frecuencia aumenta, es mayor que 13 Hz y se conoce como estado beta; en cambio, si se encuentra sumida en un sueño ligero la frecuencia baja, su valor está entre 4 y 7 Hz y se conoce como estado theta; si el sueño es profundo, la frecuencia estará entre 0.5 y 3.5 Hz y se la conoce como estado delta.

CAPÍTULO VI

Termodinámica de los sistemas biológicos

I- Conceptos físicos fundamentales de termodinámica

La termodinámica es una rama de la física que estudia los efectos de los cambios de la temperatura, presión y volumen de los sistemas físicos a un nivel macroscópico. Aproximadamente, significa "energía en tránsito" y dinámica se refiere al "movimiento", por lo que, en esencia, la termodinámica estudia la circulación de la energía y cómo la energía infunde movimiento. Históricamente, la termodinámica se desarrolló a partir de la necesidad de aumentar la eficiencia de las primeras máquinas de vapor.

El punto de partida para la mayor parte de las consideraciones termodinámicas son las leyes de la termodinámica, que postulan que la energía puede ser intercambiada entre sistemas físicos en forma de calor o trabajo. También se postula la existencia de una magnitud llamada entropía, que puede ser definida para cualquier sistema. En la termodinámica se estudian y clasifican las interacciones entre diversos sistemas, lo que lleva a definir conceptos como sistema termodinámico y su contorno. Un sistema termodinámico se caracteriza por sus propiedades, relacionadas entre sí mediante las ecuaciones de estado.

Éstas se pueden combinar para expresar la energía interna y los potenciales termodinámicos, útiles para determinar las condiciones de equilibrio entre sistemas y los procesos espontáneos.

Con estas herramientas, la termodinámica describe cómo los sistemas responden a los cambios en su entorno. Esto se puede aplicar a una amplia variedad de temas de ciencia e ingeniería, tales como motores, transiciones de fase reacciones químicas, fenómenos de transporte agujeros negros así como los procesos biológicos.

Sistema, entorno y universo: Un sistema puede ser cualquier objeto, masa, región del espacio, etc., seleccionado para estudiarlo y aislarlo (mentalmente) de todo lo demás, que pasa a ser el entorno del sistema. El sistema y su entorno forman el universo. La distinción entre sistema y entorno es arbitraria: el sistema es lo que el observador ha escogido para estudiar. La envoltura imaginaria que encierra un sistema y lo separa del entorno se llama frontera del sistema y puede pensarse que tiene propiedades especiales que sirven para: a) aislar el sistema de su entorno o para b) permitir la interacción de un modo específico entre el sistema y su ambiente [107].

I.1-Tipos de sistemas

Un sistema aislado es aquel que no puede intercambiar materia ni energía con su entorno. Un sistema cerrado es aquel que sólo puede intercambiar energía con su entorno, pero no materia. Un sistema abierto es aquel que puede intercambiar materia y energía con su entorno. Figura 1.

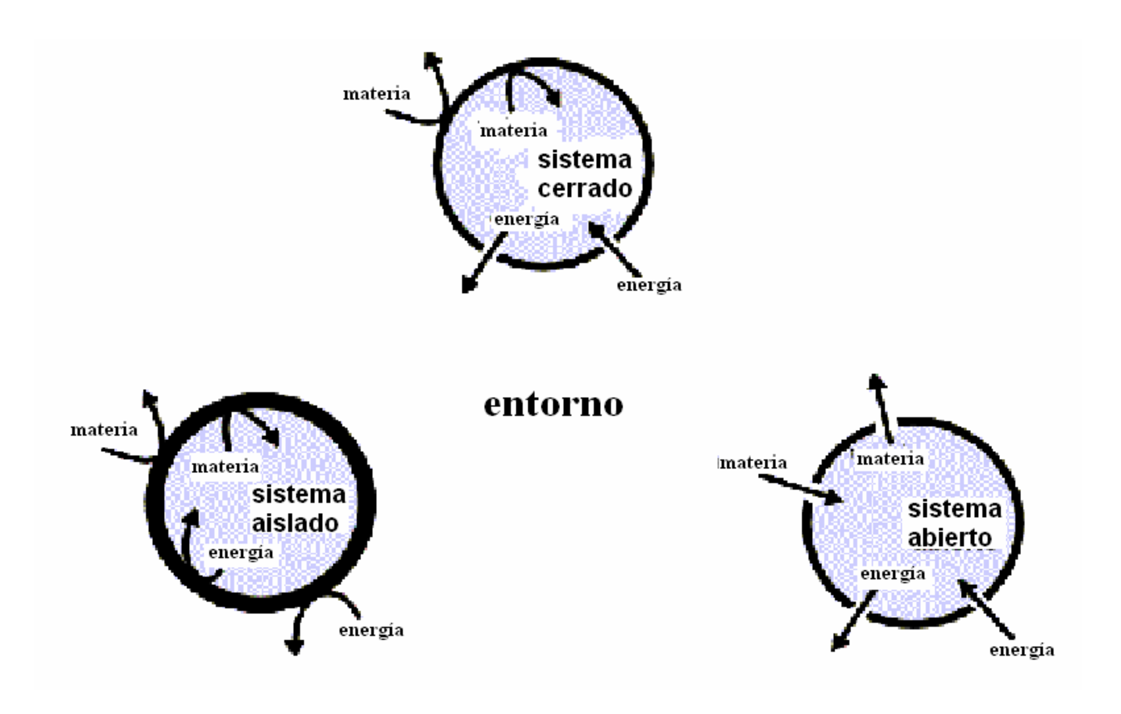


Figura 1- Tipos de sistemas

I.2-Sistema termodinámico

Un sistema termodinámico es un sistema macroscópico cuyas características microscópicas (la posición y la velocidad de las partículas en cada instante) es inaccesible y donde sólo son accesibles sus características estadísticas.

El estado de un sistema representa la totalidad de las propiedades macroscópicas asociadas con él. Cualquier sistema que muestre un conjunto de variables identificables tiene un estado termodinámico, ya sea que esté o no en equilibrio.

Denominamos estado de equilibrio de un sistema cuando las variables macroscópicas presión p, volumen V, y temperatura T, no cambian. El estado de equilibrio es dinámico en el sentido de que los constituyentes del sistema se mueven continuamente [108].

El estado del sistema se representa por un punto en un diagrama p-V. Podemos llevar al sistema desde un estado inicial a otro final a través de una sucesión de estados de equilibrio. Figura 2.

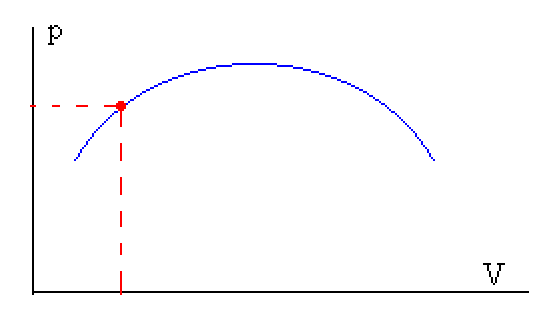


Figura 2-Representación del estado del sistema

Los sistemas termodinámicos se consideran desde el exterior, por lo tanto el trabajo está asociado a las fuerzas exteriores. El trabajo tiene dimensiones de energía y representa un intercambio de energía entre el sistema y su entorno. Dependiendo del origen físico de las fuerzas aplicadas al sistema se distinguen diferentes formas de trabajo: trabajo mecánico, eléctrico, etc. El trabajo mecánico se da cuando una fuerza que actúa sobre el sistema hace que éste se mueva una cierta distancia. Consideremos, por ejemplo, un gas dentro de un cilindro. Las moléculas del gas chocan contra las paredes cambiando la dirección de su velocidad, o de su momento lineal. El efecto del gran número de colisiones que tienen lugar en la unidad de tiempo, se puede representar por una fuerza F que actúa sobre toda la superficie de la pared. Figura 3.

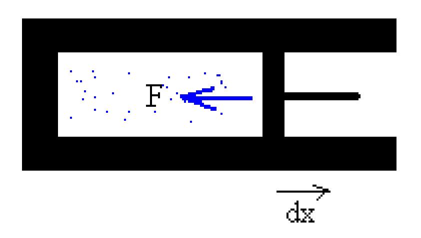


Figura 3-Fuerza ejercida sobre el sistema

Si una de las paredes es un émbolo móvil de área **A** y éste se desplaza **dx**, el intercambio de energía del sistema con el exterior puede expresarse como el trabajo realizado por la fuerza **F** a lo largo del desplazamiento **dx**.

$$dW = -Fdx = -pAdx = -pdV$$

Siendo **dV** el cambio del volumen del gas. El signo menos indica que si el sistema realiza trabajo (incrementa su volumen) su energía interna disminuye, pero si se realiza trabajo sobre el sistema (disminuye su volumen) su energía interna aumenta [109].

I.3-Temperatura

Los átomos y moléculas en una sustancia no siempre se mueven a la misma velocidad. Esto significa que hay un rango de energía (energía de movimiento o cinética) en las moléculas.

En un gas, por ejemplo, las moléculas se mueven en direcciones aleatorias y a diferentes velocidades, algunas se mueven rápido y otras más lentamente.

La temperatura es una medida del calor o energía térmica de las partículas en una sustancia. Como lo que medimos es su movimiento medio, la temperatura no depende del número de partículas en un objeto y por lo tanto no depende de su tamaño. Por ejemplo, la temperatura de una pequeña vasija de agua hirviendo es la misma que la temperatura de una olla de agua hirviendo, a pesar de que la olla sea mucho más grande y tenga millones de moléculas de agua más que en la vasija.

A menudo pensamos que calor y temperatura son lo mismo. Sin embargo este no es el caso. La temperatura y el calor están relacionadas entre si, pero son conceptos diferentes. El calor es la energía total del movimiento molecular en una sustancia, mientras temperatura es una medida de la energía molecular media. Mediante el contacto de la epidermis con un objeto se perciben sensaciones de frío o de calor, siendo esté muy caliente. Los conceptos de calor y frío son totalmente relativos y sólo se pueden establecer con la relación a un cuerpo de referencia como, por ejemplo, la mano del hombre.

Lo que se percibe con más precisión es la temperatura del objeto o, más exactamente todavía, la diferencia entre la temperatura del mismo y la de la mano que la toca. Ahora bien,

aunque la sensación experimentada sea tanto más intensa cuanto más elevada sea la temperatura, se trata sólo una apreciación muy poco exacta que no puede considerarse como medida de temperatura. Para efectuar esta última se utilizan otras propiedades del calor, como la dilatación, cuyos efectos son susceptibles. El calor no es una nueva forma de energía, es el nombre dado a una transferencia de energía de tipo especial en el que intervienen gran número de partículas. Se denomina calor a la energía intercambiada entre un sistema y el medio que le rodea debido a los choques entre las moléculas del sistema y el exterior al mismo y siempre que no pueda expresarse macroscópicamente como producto de fuerza por desplazamiento. Con muy pocas excepciones todos los cuerpos aumentan de volumen al calentarse y diminuyen cuando se enfrían. En caso de los sólidos, el volumen suele incrementarse en todas las direcciones.

La dilatación es, por consiguiente, una primera propiedad térmica de los cuerpos, que permite llegar a la noción de la temperatura [110].

La cantidad de calor que hay que proporcionar a un cuerpo para que su temperatura aumente en un número de unidades determinado es tanto mayor cuanto más elevada es la masa de dicho cuerpo y es proporcional a lo que se denomina calor específico de la sustancia de que esté constituido.

Cuando se calienta un cuerpo en uno de sus puntos, el calor se propaga a los que son próximos y la diferencia de temperatura entre el punto calentado directamente y otro situado a cierta distancia es tanto menor cuando mejor conductor del calor es dicho cuerpo. Si la conductibilidad térmica de un cuerpo es pequeña, la transmisión del calor se manifiesta por un descenso rápido de la temperatura entre el punto calentado y otro próximo. Así sucede con el vidrio, la porcelana, el caucho, etc. En el caso contrario, por ejemplo con metales como el cobre y la plata, la conductibilidad térmica es muy grande y la disminución de

temperatura entre un punto calentado y el otro próximo es muy reducida. Se desprende de lo anterior que el estudio del calor sólo puede hacerse después de haber definido de una manera exacta los dos términos relativos al propio calor, es decir, la temperatura, que se expresa en grados, y la cantidad de calor, que se expresa en calorías [110].

Se debe distinguir también entre los conceptos de calor y energía interna de una sustancia. El flujo de calor es una transferencia de energía que se lleva a cabo como consecuencia de las diferencias de temperatura. La energía interna es la energía que tiene una sustancia debido a su temperatura, que es esencialmente la energía cinética de sus moléculas a escala microscópica.

Cuando una sustancia incrementa su temperatura de TA a TB, el calor absorbido se obtiene multiplicando la masa (o el número de moles n) por el calor específico c y por la diferencia de temperatura TB-TA.

$$Q=nc(TB-TA)$$

Cuando no hay intercambio de energía (en forma de calor) entre dos sistemas, decimos que están en equilibrio térmico. El equilibrio del sistema se alcanzará cuando la temperatura de cada subsistema es la misma. La energía de cada subsistema permanece constante en el estado de equilibrio, si bien, las partículas pueden seguir intercambiando energía a nivel microscópico, el intercambio tiene lugar en ambas direcciones, no habiendo en promedio intercambio neto en ninguna de las dos.

El calor puede transferirse de un lugar a otro por tres métodos diferentes: conducción en sólidos, convección en fluidos (líquidos o gases) y radiación [111].

I.4-La conducción

Tiene lugar cuando dos objetos a diferentes temperaturas entran en contacto. El calor fluye desde el objeto más caliente hacia el más frío, hasta que los dos alcanzan a la misma

temperatura. La conducción es el transporte de calor a través de una sustancia y se produce gracias a las colisiones de las moléculas.

En el lugar donde los dos objetos se ponen en contacto, las moléculas del objeto caliente, que se mueven más rápidamente, colisionan con las del objeto frío, que se mueven más despacio. A medida que colisionan las moléculas rápidas entregan parte de su energía a las más lentas. Estas a su vez colisionan con otras moléculas en el objeto frío. Este proceso continúa hasta que la energía del objeto caliente se extiende por el frío. Algunas sustancias conducen el calor mejor que otras. Los sólidos son mejores conductores que los líquidos y éstos mejor que los gases; los metales son muy buenos conductores de calor, mientras que el aire es muy mal conductor.

I.5-Convección

En líquidos y gases la convección es usualmente la forma más eficiente de transferir calor. La convección tiene lugar cuando áreas de fluido caliente ascienden hacia las regiones de fluido frío. Cuando esto ocurre, el fluido frío desciende tomando el lugar del fluido caliente que ascendió. Este ciclo da lugar a una continua circulación en que el calor se transfiere a las regiones frías.

I.6-Radiación

Tanto la conducción como la convección requieren la presencia de materia para transferir calor. La radiación es un método de transferencia de calor que no precisa de contacto entre la fuente y el receptor del calor. Por ejemplo, podemos sentir el calor del Sol aunque no podemos tocarlo. El calor se puede transferir a través del espacio vacío en forma de radiación térmica. Esta, conocida también como radiación infrarroja, es un tipo de radiación electromagnética (o luz). La radiación es por tanto un tipo de transporte de calor que

consiste en la propagación de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz. No se produce ningún intercambio de masa y no se necesita ningún medio.

I.7-Escalas de medición de la temperatura

Las escalas de medición de la temperatura se dividen fundamentalmente en dos tipos, las relativas y las absolutas. Ya que los valores que puede adoptar la temperatura de los sistemas, aún que no tienen un máximo, sí tienen un nivel mínimo, el cero absoluto. Mientras que las escalas absolutas se basan en el cero absoluto, las relativas tienen otras formas de definirse [111].

Relativas

Unidades derivadas del SI

Grado Celsius (°C). Para establecer una base de medida de la temperatura Anders Celsius utlizó (en 1742) los puntos de fusión y ebullición del agua. Se considera que una mezcla de hielo y agua que se encuentra en equilibrio con aire saturado a 1 atm está en el punto de fusión. Una mezcla de agua y vapor de agua (sin aire) en equilibrio a 1 atm de presión se considera que está en el punto de ebullición. Celsius dividió el intervalo de temperatura que existe entre éstos dos puntos en 100 partes iguales a las que llamó grados centígrados °c. Sin embargo en 1948 fueron renombrados grados Celsius en su honor, así mismo se comenzó a utilizar la letra mayúscula para denominarlos.

En 1954 la escala Celsius fue redefinida en la Décima Conferencia de Pesos y Medidas en términos de un solo punto fijo y de la temperatura absoluta del cero absoluto. El punto escogido fue el punto triple del agua que es el estado en el que las tres fases del agua coexisten en equilibrio, al cual se le asignó un valor de 0,01 °C.

La magnitud del nuevo grado Celsius se define a partir del cero absoluto como la fracción 1/273,16 del intervalo de temperatura entre el punto triple del agua y el cero absoluto. Como en la nueva escala los puntos de fusión y ebullición del agua son 0,00 °C y 100,00 °C respectivamente, resulta idéntica a la escala con la definición anterior con la ventaja de tener una definición termodinámica.

Grado Fahrenheit (°F). Toma divisiones entre los puntos de congelación y evaporación de disoluciones de cloruro amónico. Es una unidad típicamente usada en los países anglosajones.

Grado Réaumur (°Ré, °Re, °R). Usada para procesos industriales específicos, como el almíbar.

Grado Romer o Roemer. En desuso.

Grado Newton (°N). En desuso.

Grado Leiden. Usada para calibrar indirectamente bajas temperaturas. En desuso.

Grado Delisle. En desuso.

Absolutas

Las escalas que asignan los valores de la temperatura en dos puntos diferentes se conocen como *escalas a dos puntos*. Sin embargo en el estudio de la termodinámica es necesario tener una escala de medición que no dependa de las propiedades de las sustancias. Las escalas de éste tipo se conocen como escalas absolutas o escalas de temperatura termodinámicas.[111]

Sistema Internacional de Unidades (SI)

Kelvin (K) El Kelvin es la unidad de medida del SI, y siendo la escala Kelvin absoluta parte del cero absoluto y define la magnitud de sus unidades de tal forma que el punto triple del agua este exactamente a 273,16 K. Aclaración*:* No se le antepone la palabra grado ni el símbolo º.

Sistema Anglosajón de Unidades:

Grado Rankine (°R o °Ra). Escala con intervalos de grado equivalentes a la escala fahrenheit. Con el origen en -459,67°F (aproximadamente)

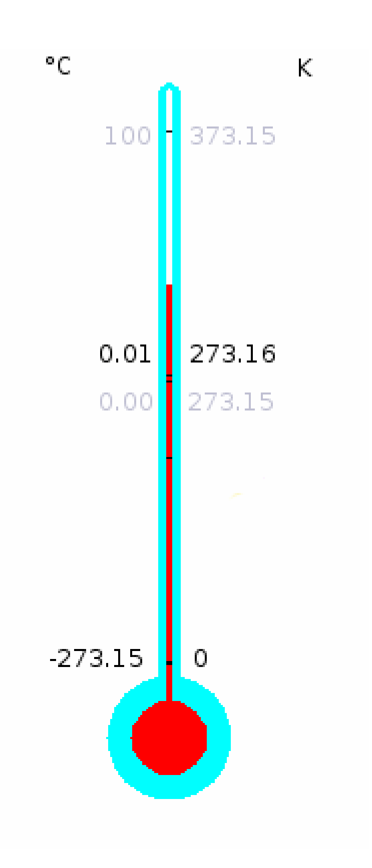


Figura 4- Se comparan las escalas Celsius y Kelvin mostrando los puntos de referencia anteriores a 1954 y los posteriores para mostrar como ambas convenciones coinciden. De color negro aparecen el punto triple del agua (0.01 °C, 273.16 K) y el cero absoluto (-273.15 °C, 0 K). De color gris los puntos de congelamiento (0.00 °C, 273.15 K) y ebullición del agua (100 °C, 373.15 K).

I.8-Principio Cero de la termodinámica

Cuando dos sistemas están en equilibrio mutuo, comparten una determinada propiedad. Esta propiedad se puede medir, y se le puede asignar un valor numérico definido. Una consecuencia de ese hecho es el principio cero de la termodinámica, que afirma que si dos sistemas distintos están en equilibrio termodinámico con un tercero, también tienen que estar en equilibrio entre sí.
Esta propiedad compartida en el equilibrio es la temperatura [112].

I.9-Primera ley de la Termodinámica

La primera ley de la termodinámica, posiblemente sea (junto con la ley de gravitación universal y el principio de acción y reacción) la de mayor extensión del mundo, solo que no se la suele asociar a la termodinámica, es aquella que dice que la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. Se puede decir que el primer principio es una generalización de la segunda ley de Newton (conservación del movimiento). También conocido como principio de conservación de la energía para la termodinámica Esta ley da una definición precisa del calor. Su sentido físico es éste, en cualquier proceso termodinámico (proceso donde se ponga en juego energía) la energía se emplea en, bien transformarse en otro tipo de energía o bien en realizar algún trabajo. Como ejemplo situémonos con Galileo en la Torre de Pisa cuando realizó su famoso experimento de arrojar objetos desde allí. Los objetos poseían energía potencial (debido a la altura) en el momento anterior a ser arrojados, y cuando éste los arrojó, durante su caída dichos objetos iban transformando su energía potencial en energía cinética debido a la pérdida de altura por un lado y a la aceleración que iban sufriendo por otro. Los objetos también realizaban un trabajo, mover el aire que tenían alrededor para poder caer. Haciendo un balance energético nos encontraríamos que: $Ep=Ec+W$, y así tendríamos un sistema que conservaría la energía.

[113.] **Leibniz* en 1693 enuncia un primer principio de conservación de la energía. Éste se refería sólo a la suma de la energía cinética y la energía potencial de una masa situada en el campo gravitatorio terrestre.

El primer principio identifica el calor como una forma de energía. Esta idea, que hoy parece elemental, tardó mucho en abrirse camino y no fue formulada hasta la década de 1840, gracias a las investigaciones de ***Mayer* y ****Joule* principalmente. Anteriormente, se pensaba que el calor era una sustancia indestructible y sin peso (calórico) que no tenía que ver con la energía. En ella se establece que si se realiza trabajo sobre un sistema o bien éste intercambia calor con otro, la energía interna del sistema cambiará. Visto de otra forma, esta ley permite definir el calor como la energía necesaria que debe intercambiar el sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna. Fue propuesta por **** *Antoine Lavoisier* [114]

**Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) Filósofo, matemático y estadista alemán, considerado como uno de los mayores intelectuales del siglo XVII*

***Julius von Mayer (1814-1878), médico y físico alemán, conocido por ser el primero en establecer el equivalente mecánico del calor. Mayer fue también el primero en establecer el principio de conservación de la energía, en especial en los fenómenos biológicos y en los sistemas físicos*

****James Prescott Joule (1818-1889), físico británico. Uno de los más notables físicos de su época, es conocido sobre todo por su investigación en electricidad y termodinámica. Joule verificó experimentalmente la ley de la conservación de energía en su estudio de la conversión de energía mecánica en energía térmica.*

*****Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), químico francés, considerado el fundador de la química moderna. Lavoisier realizó los primeros experimentos químicos realmente cuantitativos. Demostró que en una reacción química, la cantidad de materia es la misma al final y al comienzo de la reacción. Estos experimentos proporcionaron pruebas para la ley de la conservación de la materia*

O sea, como la energía no puede crearse ni destruirse, dejando a un lado las posteriores ramificaciones de la equivalencia entre masa y energía, la cantidad de energía transferida a un sistema en forma de calor más la cantidad de energía transferida en forma de trabajo sobre el sistema debe ser igual al aumento de la energía interna del sistema.

$$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema}$$

I.10-Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica es de las que más dificultad de asimilación entraña con la incursión del concepto de entropía. Viene a decir que en un sistema cerrado y ausente de equilibrio la entropía aumenta hasta equilibrar el sistema. La segunda ley de la termodinámica fue enunciada por **S. Carnot* en 1824. Esta ley regula la dirección en la que deben llevarse a cabo los procesos termodinámicos y, por lo tanto, la imposibilidad de que ocurran en el sentido contrario (por ejemplo, que una mancha de tinta dispersada en el agua pueda volver a concentrase en un pequeño volumen). También establece, en algunos casos, la imposibilidad de convertir completamente toda la energía de un tipo en otro sin pérdidas. [115]

De esta forma, La Segunda ley impone restricciones para las transferencias de energía que hipotéticamente pudieran llevarse a cabo teniendo en cuenta sólo el Primer Principio.

**Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), físico e ingeniero militar francés. En 1824 describió su concepción del motor ideal, el llamado motor de Carnot, en el que se utiliza toda la energía disponible. Descubrió que el calor no puede pasar de un cuerpo más frío a uno más caliente, y que la eficacia de un motor depende de la cantidad de calor que es capaz de utilizar. Este descubrimiento es la base de la segunda ley de la termodinámica.*

Esta ley apoya todo su contenido aceptando la existencia de una magnitud física llamada entropía tal que, para un sistema aislado (que no intercambia materia ni energía con su entorno), la variación de la entropía siempre debe ser mayor que cero. O sea, que durante cualquier cambio físico ó químico, una parte de energía se transforma en una forma de energía desordenada al azar que no es útil. Existen dos formas de energía útil:

-*Energía libre, es la que puede realizar trabajo a temperatura y presión constante, se representa por la letra G.*

-*Energía calórica, es la que puede realizar trabajo generando un cambio en la temperatura y la presión.*

Fue **Boltzmann* quien introdujo la definición de entropía de un sistema como la medida de su nivel de desorden Debido a esta ley también se tiene que el flujo espontáneo de calor siempre es unidireccional, desde los cuerpos a temperatura más alta a aquellos de temperatura más baja. Existen numerosos enunciados equivalentes para definir este principio, destacándose el de ****Clausius* y el de ****Kelvin.*

Enunciado de Clausius: No es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la extracción de calor de un recipiente a una cierta temperatura y la absorción de una cantidad igual de calor por un recipiente a temperatura más elevada.

Enunciado de Kelvin: No existe ningún dispositivo que, operando por ciclos, absorba calor de una única fuente y lo convierta íntegramente en trabajo.

**Ludwig Boltzmann (1844-1906), físico austriaco, publicó una serie de ensayos que demostraban que la segunda ley de la termodinámica podría explicarse analizando estadísticamente los movimientos de los átomos.*

***Rudolf Emanuel Clausius (1822-1888), físico matemático alemán, uno de los fundadores de la termodinámica. Clausius fue el primero en enunciar la denominada segunda ley de la termodinámica (1850):*

****Lord Kelvin o William Thomson (1824-1907), matemático y físico británico, uno de los principales físicos y más importantes profesores de su época. En 1848 Kelvin estableció la escala absoluta de temperatura que sigue llevando su nombre*

La segunda ley afirma que la entropía, o sea, el desorden, de un sistema aislado nunca puede decrecer. Por tanto, cuando un sistema aislado alcanza una configuración de máxima entropía, ya no puede experimentar cambios: ha alcanzado el equilibrio.

La naturaleza parece pues "preferir" el desorden y el caos. Se puede demostrar que el segundo principio implica que, si no se realiza trabajo, es imposible transferir calor desde una región de temperatura más baja a una región de temperatura más alta.

La segunda ley nos dice que muchos procesos son irreversibles. Por ejemplo, el enunciado de Clausius específicamente elimina una inversión simple del proceso de transmisión de calor de un cuerpo caliente, a un cuerpo frío. Algunos procesos, no solo no pueden regresarse por sí mismos, sino que tampoco ninguna combinación de procesos pueden anular el efecto de un proceso irreversible, sin provocar otro cambio correspondiente en otra parte.

I.11-Ciclos termodinámicos

Todas las relaciones termodinámicas importantes se derivan del primer y segundo principios de la termodinámica. Resulta útil tratar los procesos termodinámicos basándose en ciclos: procesos que devuelven un sistema a su estado original después de una serie de fases, de manera que todas las variables termodinámicas relevantes vuelven a tomar sus valores originales. En un ciclo completo, la energía interna de un sistema no puede cambiar, puesto que sólo depende de dichas variables. Por tanto, el calor total neto transferido al sistema debe ser igual al trabajo total neto realizado por el sistema.[116]Un motor térmico de eficiencia perfecta realizaría un ciclo ideal en el que todo el calor se convertiría en trabajo mecánico. Carnot, que concibió un ciclo termodinámico que constituye el ciclo básico de todos los motores térmicos, demostró que no puede existir ese motor perfecto. Cualquier motor térmico pierde parte del calor suministrado. El segundo principio de la termodinámica impone un límite superior a la eficiencia de un motor, límite que siempre es menor del 100%.

La eficiencia límite se alcanza en lo que se conoce como ciclo de Carnot. Figura 5.

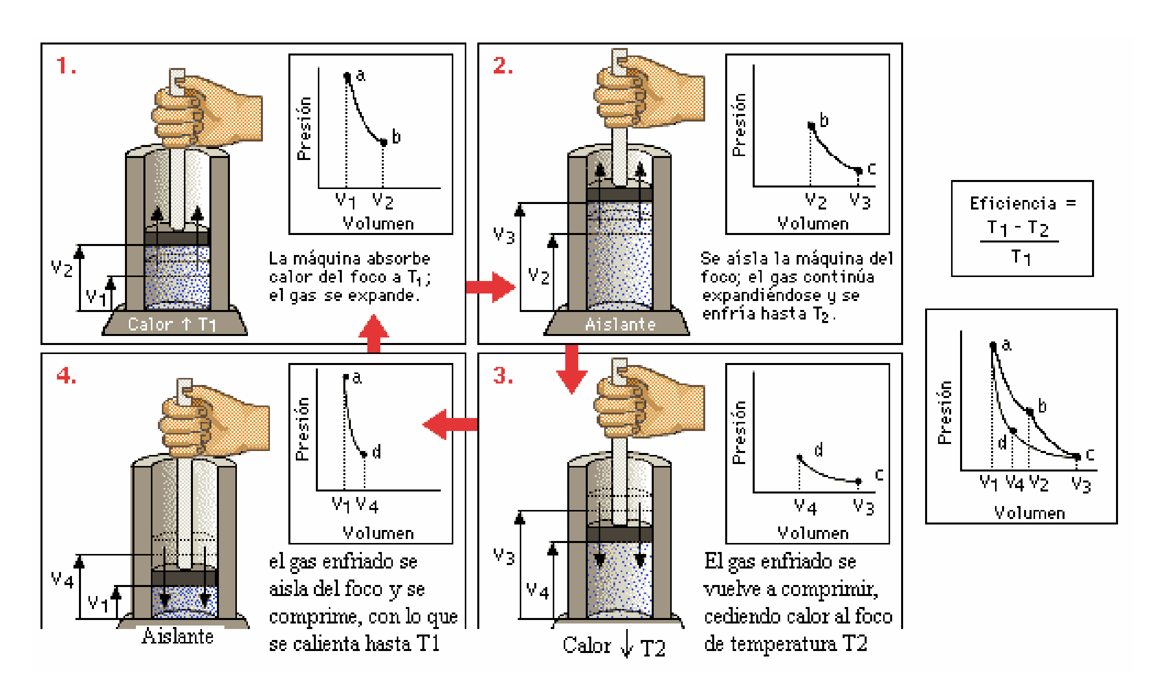


Figura 5- Ciclo de Carnot

I.12-Tercera ley de la termodinámica.

En el análisis de muchas reacciones químicas es necesario fijar un estado de referencia para la entropía.

Este siempre puede escogerse algún nivel arbitrario de referencia cuando solo se involucra un componente; para las tablas de vapor convencionales se ha escogido 320F. Sobre la base de las observaciones hechas por **Nernst* y por otros, ***Planck* estableció la tercera ley de la termodinámica en 1912, así: La entropía de todos los sólidos cristalinos perfectos es cero a la temperatura de cero absoluto. Un cristal "perfecto" es aquel que esta en equilibrio termodinámico.

**Walther Nernst (1864-1941), químico físico y premio Nóbel alemán, conocido por sus aportaciones en el campo de la termodinámica. Nernst desarrolló lo que después se llamó tercer principio de la termodinámica, que resultó útil para el desarrollo de la teoría cuántica.*

***Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), físico alemán, premiado con el Nóbel, considerado el creador de la teoría cuántica.*

En consecuencia, comúnmente se establece la tercera ley en forma más general, como la entropía de cualquier sustancia pura en equilibrio termodinámico tiende a cero a medida que la temperatura tiende a cero [117].

El segundo principio sugiere la existencia de una escala de temperatura absoluta con un cero absoluto de temperatura. El tercer principio de la termodinámica afirma que el cero absoluto no se puede alcanzar por ningún procedimiento que conste de un número finito de pasos y como en física un número infinito de procesos es un número imposible, quiere decir que no se puede llegar al cero absoluto. Es posible acercarse indefinidamente al cero absoluto, pero nunca se puede llegar a él.Es fácil de entender, imaginemos un asteroide de paseo por el universo, pasa al lado de otro asteroide, el segundo, más frío que nuestro asteroide le roba energía (por el segundo principio) y va bajando su temperatura, llega otro asteroide más frío y le vuelve a robar temperatura, así sucesivas veces hasta que estamos a punto de tener un asteroide sin temperatura, pero, ¿quién estará tan frío como para que nosotros le demos calor y aún así no contravengamos la segunda ley? El último asteroide debería estar por debajo del cero absoluto para recibir energía nuestra y que después de recibirla ambos quedáramos en equilibrio térmico. Nadie escapa a la termodinámica.

La termodinámica es de las ramas más importantes de la ciencia en general y de la física en particular. Cualquier proceso, sea de la naturaleza que sea, tiene su explicación termodinámica, a veces más sencilla otras más compleja, pero es algo innegable.

I.13-Procesos irreversibles.

Las propiedades termodinámicas de un sistema vienen dadas por los atributos físicos macroscópicos observables en él, mediante la observación directa o mediante algún instrumento de medida. De esta forma se puede decir:

-*Que un sistema está en equilibrio termodinámico cuando no se observa ningún cambio en sus propiedades termodinámicas a lo largo del tiempo.*

-Que un estado de no equilibrio es un estado con intercambios netos de masa o energía y en el que sus parámetros característicos dependen en general de la posición y del tiempo. Si no dependen de este último, necesitan la intervención del entorno para mantener sus valores (estado estacionario fuera del equilibrio). Un proceso es reversible si su dirección puede invertirse en cualquier punto mediante un cambio infinitesimal en las condiciones externas. Para los procesos reversibles es posible basar los cálculos en las propiedades del sistema (con independencia de los del entorno). Una transformación es reversible si se realiza mediante una sucesión de estados de equilibrio del sistema con su entorno y es posible devolver al sistema y su entorno al estado inicial por el mismo camino. Reversibilidad y equilibrio son, por tanto, equivalentes. Si una transformación no cumple estas condiciones se llama irreversible [118]. Todos los procesos naturales son irreversibles hasta cierto punto por lo que no se puede generalizar la modelación de procesos como reversibles ya que esto no sería una buena aproximación de la realidad.[119]

II- Termodinámica de los sistemas biológicos.

Una de las partes de la física que más interesa a la biología es la termodinámica. La importancia de la termodinámica para la biología deriva de su carácter macroscópico. La termodinámica persigue la comprensión de los fenómenos sin necesidad de precisar el detalle de los eventos microscópicos que los sustentan. Por ejemplo, la termodinámica puede explicar porqué una persona crece o muere sin necesidad de referirse a los miles de billones de sucesos atómicos involucrados en el hecho global.

La termodinámica de los procesos irreversibles resulta ser una disciplina fundamental para el estudio de los sistemas biológicos, ya que cualquier ser vivo, para mantener su organización, esta sometido a un flujo ininterrumpido de energía. Desde la termodinámica, pueden ser abordados no sólo los problemas de la conservación de la vida, de su regulación y de su reproducción, sino también problemas tales como el de la aparición de estructuras

organizadas (redes neuronales o neuronales) [119.] La termodinámica en esencia enuncia leyes muy generales relativas a las variaciones de energía sin formular hipótesis sobre el mecanismo íntimo de los fenómenos. Es una descripción de índole fenomenológica. En una primera etapa la termodinámica se ocupo del estudio de sistemas próximos al estado de equilibrio pero atravesados por un cierto flujo de energía; llamada termodinámica de fenómenos irreversibles, que fue desarrollada hacia 1930 por **Onsager*, lo que le valió el premio Nóbel de química en 1968. Esta termodinámica de los procesos irreversibles aportó una aproximación más precisa a los sistemas biológicos, pues el ser vivo no es un sistema termodinámico en equilibrio sino, al contrario, en intercambio constante de energía con el medio externo. La termodinámica clásica no se preocupa por el tiempo necesario para pasar de un estado inicial a un estado final, ni de la velocidad de los procesos que realizan desdoblamiento proteínico, activación de neurotransmisores, envejecimiento celular etc.[120]Ahora bien, dado que los sistemas biológicos son estrechamente tributarios, es decir sensibles a esa variable a la que llamamos tiempo, éstos deben estar en constante lucha para evitar la degradación irreversible hacia la cual lo lleva el aumento de entropía. Para evitar ese nivelamiento energético, que es la muerte, los organismos deben luchar constantemente contra la entropía, hecho que demanda un aporte continuo de energía. De aquí, que un sistema vivo no pueda ser descrito por una termodinámica cercana al equilibrio pues, la vida se caracteriza por procesos que están lejos del equilibrio[121].

II.1Bioenergética

Es la ciencia que estudia las transformaciones de la energía que tienen lugar en los seres vivos.

**Lars Onsager (1903-1976) químico estadounidense, de origen noruego, galardonado con el Premio Nóbel de Química del año 1968.*

Por su etimología, cabe definirla cómo una ciencia puente que trata de aplicar al ser vivo los principios universales de la Energética y ésta, a su vez, se define como la parte de la Física que estudia los diversos tipos de energía y sus interconversiones mutuas. La energía, entendida como la capacidad de producir trabajo, se presenta en el ser vivo adoptando distintas formas: mecánica, eléctrica, química, térmica, lumínica, etc., formas que resultan interconvertibles unas en otras obedeciendo a unas leyes o principios globalmente establecidos por la Termodinámica. El segundo principio de la Termodinámica señala el sentido de las transformaciones energéticas y, de acuerdo con él, la energía pasa de situaciones poco probables a otras más probables.

En términos sencillos, se afirma que las reacciones o procesos físicos y químicos tienden a buscar la situación más caótica o desordenada posible y sólo entonces se alcanza el equilibrio.[122]. Hoy día se acepta que los seres vivos cumplen perfectamente las leyes generales de la energética, si bien de un modo peculiar. Aunque el ser vivo forma una entidad biológicamente separada del ambiente, desde el punto de vista energético debe ser considerado como un sistema abierto, es decir, con intercambio constante de materia y energía con el propio ambiente. En los seres vivos, los fenómenos fisicoquímicos son muy complejos; en ellos se producen reacciones altamente improbables, casi imposibles, pero van de tal manera acoplada a otras reacciones favorables, que el sistema *ser vivoambiente* (globalmente considerado) tiende a una situación de mayor estabilidad, es decir, cumple las leyes termodinámicas. La Termodinámica define varias magnitudes (funciones de estado) que miden cuantitativamente estos conceptos cualitativos que se manejan en la biología. Entre ellas nos interesan especialmente dos: La medida del desorden viene dada por una función llamada entropía **(v)** que crece constantemente en todos los procesos irreversibles, de modo que el universo tiende progresivamente a la uniformidad y al caos.

Los seres vivos luchan constantemente contra su propio desorden, manteniéndose en una

situación de mínima entropía, pero para conseguirlo desordenan extraordinariamente el ambiente (eliminando sustancias de desecho, captando alimentos organizados, expulsando calor, etc.) de tal modo que el balance global *ser vivoambiente* supone un incremento ostensible de la entropía.

La espontaneidad de las reacciones se mide por otra función de estado, la energía libre, que equivale a la medida del trabajo útil que puede producir una reacción. Desde el punto de vista energético, las reacciones se clasifican en exoergónicas, cuando liberan parte de la energía libre almacenada en las sustancias reaccionantes, y endoergónicas cuando absorben energía libre del exterior para almacenarla en los productos finales de la reacción que lógicamente contienen más energía que las sustancias reaccionantes [124]. La Biología utiliza estas funciones para explicar el sentido de los procesos biológicos; la energía presente en las sustancias orgánicas es captada por el ser vivo mediante unas trasformaciones químicas que convierten estas sustancias (alimentos) en productos de desecho, que son expulsados del ser vivo, a la vez que buena parte de la energía libre almacenada en estas sustancias se utiliza para realizar diversos tipos de trabajo inherentes a la propia vida [125].

Así, por ejemplo, la energía química de los alimentos se convierte en trabajo mecánico (contracciones musculares), trabajo eléctrico (potenciales de membrana, impulsos nerviosos), trabajo osmótico (filtraciones contra gradientes desfavorables, transporte activo) y trabajo químico: síntesis de las nuevas sustancias que constituyen la propia materia del ser vivo.

Esta capacidad de ordenar la energía del ambiente para construir con ella la estructura propia, aumentar la propia masa (crecer), crear nuevos seres análogos (reproducirse) son propiedades características de los seres vivos.

Todas las células transforman energía. Por ejemplo, las células vegetales utilizan la luz solar

para obtener carbohidratos (azúcares y almidón) a partir de principios químicos inorgánicos simples. [126]

En este proceso, denominado fotosíntesis, la energía solar se convierte en energía química de reserva. Si los carbohidratos de estas plantas son ingeridos por un animal, se produce su ruptura y su energía química se transforma en movimiento (energía cinética), calor corporal o enlaces químicos nuevos En toda esta serie de transformaciones, existe una pérdida de energía hacia el medio ambiente, generalmente en forma de energía térmica (calor). Esta energía no puede generar trabajo útil debido a que se ha liberado. La segunda ley de la termodinámica establece que, con el tiempo, cualquier sistema tiende a un desorden mayor; es decir, incrementa su entropía. Evitar el aumento de la entropía es en general imposible, es decir, una parte del universo podría esforzarse por mantener su propio volumen de orden o información al gasto de otras partes. Semejante universo subalterno esta en condiciones termodinámicas, lejos del equilibrio. Los organismos vivientes hacen ejemplos buenos de tales universos subalternos.

Los procesos que nosotros asociamos con la vida ocurren lejos del equilibrio, la vida exige el mantenimiento activo de estructuras en el desafío de la entropía, sin mantenimiento se deterioraría y desaparecería. Por ejemplo, las membranas celulares no son bolsas pasivas, son superficies activas que constantemente trabajan para asegurar la integridad de los volúmenes al gasto del ambiente. En cuanto ellas detengan el funcionamiento, la célula deja de existir [127].

Cuando un ser vivo pierde esta capacidad de ordenar la energía exterior en su propio beneficio, este ser, siguiendo las leyes de la máxima probabilidad, sufre unas reacciones degradativas que tienden a uniformarlo con el ambiente; y entonces afirmamos que el ser vivo ha muerto. En un orden más práctico podemos acercarnos a ejemplos que vinculen nuestras vidas cotidianas en la práctica médica con las leyes de la termodinámica y que nos

permitan demostrar que el calor y el frío han sido usados para propósitos médicos durante siglos. Desde la antigüedad se recomendaba el uso del calor para algunas enfermedades (baños de aceite caliente o en aguas termales), mientras que para otras enfermedades se recomendaba la aplicación de sustancias frías.

La controversia sobre estos tratamientos subsiste hasta nuestros días; sin embargo, ha habido progresos debidos a la colaboración entre médicos, físicos y pacientes [128].

II.2-Termometría

Es la parte de la física que se encarga de la medida de la temperatura, mientras que la *termografía* es la parte de la medicina que se encarga de hacer un registro gráfico de la temperatura del cuerpo humano que puede usarse en el diagnóstico y la terapia del calor; mientras que la *criogenia* y la *criocirugía* son términos que se refieren a los usos del frío. Para entender lo que es la temperatura físicamente, recurriremos a un modelo molecular: las moléculas que componen la materia están en movimiento incesante, caracterizadas por una cierta cantidad de energía cinética o energía de movimiento que pueden trasmitir a otras moléculas a través de choques; esta energía está relacionada directamente con la temperatura, ya que ésta será mayor cuando los choques de las moléculas entre sí aumenten [129]. Para poder elevar la temperatura de un cuerpo, es necesario imprimirle energía cinética a sus moléculas. Por ejemplo, cuando se añade suficiente calor a un sólido, éste se funde, pasando al estado líquido, y llega a gas al aumentar su temperatura. Si se continúa añadiendo temperatura el gas se comienza a ionizar. Mientras añadimos energía, y ésta es en forma de energía cinética de modo que el movimiento de las moléculas aumenta, hablamos de aumentar el calor, pero también es posible lo contrario: restar energía, en cuyo caso hablamos de enfriar el cuerpo. Cuando nos referimos a bajas temperaturas entramos a la *criogenia*.

El límite de esta región es el "cero absoluto" o cero grados en la escala de Kelvin, temperatura a la cual las partículas no tienen energía cinética, por lo que, en principio, no existe el movimiento. La temperatura del cuerpo humano varía entre los 34° y los 42°C, por lo que un termómetro para medir la temperatura ambiente no es lo adecuado para el cuerpo humano. Cuando se usa un termómetro electrónico, la lectura es muy rápida, mientras que si el termómetro es de mercurio (el más común), hay que esperar el tiempo suficiente para que la lectura sea la correcta, aproximadamente 3 ó 4 minutos, de otra manera no es confiable.

Las medidas de la temperatura de las diferentes partes del cuerpo humano indican que ésta varía prácticamente de punto a punto, dependiendo de múltiples factores tanto externos al cuerpo como internos; el flujo sanguíneo cerca de la piel es el factor dominante. El mapa de la temperatura corporal se conoce como *termograma*. Y se usa en diagnósticos de cáncer principalmente, ya que éste se caracteriza porque sus células se encuentran a temperaturas relativamente altas respecto a las restantes; la temperatura en la piel, sobre un tumor (que puede ser interno), es 1°C por encima del promedio. La termografía también se usa frecuentemente en el estudio de la circulación de la sangre, principalmente en la cabeza, ya que diferencias en la temperatura entre los lóbulos derecho e izquierdo son indicativas de problemas circulatorios [130]. Los beneficios terapéuticos del calor son conocidos hace siglos: los baños de agua caliente son muy relajantes, el calentar una cierta área del cuerpo provoca una aceleración en el metabolismo, produciendo vasodilatación e incremento en el flujo sanguíneo, lo que resulta beneficioso.

III-Tecnologías y terapéuticas médicas relacionadas con las aplicaciones de la temperatura

III.1Termómetro

Uno de los primeros intentos para hacer un estándar de temperaturas ocurrió alrededor de 170 a.C., cuando Galeno, en sus notas médicas, propone un estándar de temperatura "neutral" completando cantidades iguales para la ebullición del agua y el hielo. Sobre cualquier lado de esta temperatura tenía cuatro grados de calor y cuatro grados de frío respectivamente. Fue Galileo Galilei en 1592 el inventor del antecesor del termómetro inventando el termoscopio (Figura 6)

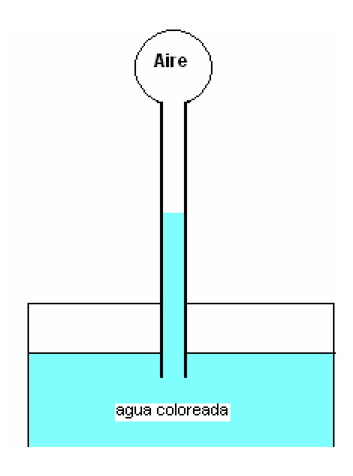


Figura 6- Termoscopio de Galileo

Consistían en un bulbo de vidrio que tiene un largo tubo extendido hacia abajo colocado dentro de un recipiente que contiene agua con colorante (aunque Galileo utilizó vino). Algo del aire contenido dentro del bulbo se expulsa, por lo cual el líquido se eleva a través del tubo para tomar su lugar. Como el aire remanente del bulbo se calienta o enfría, el nivel de líquido en el tubo varia por consecuencias del cambio de la temperatura del aire, o sea, el termoscopio indicaba las variaciones de temperatura por la contracción o dilatación de una masa de aire. Colocando una escala grabada sobre el tubo, se podía medir en forma cuantitativa estas fluctuaciones. Las desventajas del termoscopio eran que dependía de la

presión atmosférica, que no tenía una escala estandarizada y en el caso de la temperatura corporal, era incorrecta dependiendo que quien la tomara

En 1641 el primer termómetro sellado que usó líquido en vez de aire como medio termométrico fue desarrollado por Ferdinand II, Gran Duque de Toscana. Su termómetro usó un equipo sellado en vidrio dentro del cual había alcohol, con 50 "grados" marcados sobre el tubo pero no fue utilizado un "punto fijo" para el cero de la escala, Estos fueron referidos como termómetros de "espíritu".

En 1664, Robert Hook usó un tinte rojo en alcohol. Su escala, para la cual todos los grado representaban un igual incremento de volumen equivalente alrededor de 1/500 partes de el volumen del líquido del termómetro, necesitó solo un punto fijo.

El seleccionó el punto de congelamiento del agua. Por una escala presentada de esta manera, Hook presentó que un mismo estandar puede ser establecido para termómetros de tamaños diferentes. El termómetro original de Hook quedó conocido como un estándar del Gresham College y fue usado por la Sociedad Real hasta 1709. (El primer registro meteorológico inteligible usó esta escala).

En 1702, el astrónomo Ole Roemer de Copenhagen basó su escala en dos puntos fijos: nieve (o hielo comprimido) y el punto de ebullición del agua, y registró la temperatura diaria en Copenhagen desde 1708 a 1709 con su termómetro.

Fue en 1724 que Gabriel Fahrenheit usó mercurio como liquido termométrico (Figura 7).



Figura 7- Termómetro clínico

La expansión térmica del mercurio es amplia y suavemente uniforme, esto permite que no se adhiera al vidrio y permanece líquido ante un amplio rango de temperaturas. Su apariencia plateada hace que sea fácil de leer. Fahrenheit describió como calibró la escala de mercurio de su termómetro de la siguiente manera:

"…….Colocando el termómetro en un mezcla de sal de amonio o agua salada, hielo y agua, un punto sobre la escala pudo ser encontrado el cual llamé cero. Un segundo punto fue obtenido de la misma manera, si la mezcla es usada sin sal. Denotando este punto como 30. Un tercer punto designado como 96 fue obtenido colocando el termómetro en la boca para adquirir el calor del cuerpo humano."……. (D.G Fahrenheit, *Phil. Trans. (London) 33, 78, 1724)*

En 1745 Carlos Linneo de Upsala, Suecia, describió una escala en la cual el punto de congelamiento del agua era 100 y el punto de ebullición cero haciendo esto una escala centígrada. Anders Celsius (1701-1744) usó la escala al revés en la cual cero representó el punto de congelamiento y 100 el punto de ebullición del agua, manteniendo los 100 grados entre los dos puntos. En 1948 el término Grado Centígrado fue reemplazado por el de Grados Celsius. Temperaturas medidas sobre una escala centígrada, con el punto de congelamiento del agua como cero, son designadas como grados Celsius (°C)

La temperatura del cuerpo humano, en general, es medida utilizando termómetros ya sea orales, anales o de contacto con la piel. También pueden ser electrónicos, de mercurio, de alcohol, etcétera. Una forma muy común de comparar la temperatura del cuerpo es simplemente colocar la mano sobre la frente de otra persona y comparar su temperatura con la nuestra. Éste es un método muy primitivo para poder comparar la temperatura, pero es efectivo.

La temperatura del cuerpo humano varía entre los 34° y los 42°C, por lo que un termómetro para medir la temperatura ambiente no es lo adecuado para el cuerpo humano. Cuando se usa un termómetro electrónico, la lectura es muy rápida, mientras que si el termómetro es de mercurio (el más común), hay que esperar el tiempo suficiente para que la lectura sea la correcta, aproximadamente 3 o 4 minutos, de otra manera no es confiable.

Otra manera de aprovechar los diferentes registros de temperatura corporal en función de la excelencia de la práctica médica es por medio de la *termografía*. Esta es la medida del calor corporal emitido por la piel. El mapa de la temperatura corporal se conoce como *termograma* y fundamentalmente se usa en diagnósticos de patologías malignas principalmente, ya que ésta afecciones se caracterizan porque sus células se encuentran a temperaturas relativamente altas respecto a las restantes; la temperatura en la piel, sobre un tumor (que puede ser interno), es 1°C arriba del promedio.

Mediante placas fotográficas o receptores de imagen sensibles a los *infrarrojos* (espectro electromagnético del calor) se obtienen termogramas de la totalidad o parte del cuerpo.

Las variaciones de la temperatura cutánea dependen, entre otros factores, del número de vasos sanguíneos y de su cercanía a la superficie corporal. Un punto caliente de forma anormal puede indicar el desarrollo de tejido neoplásico, mientras que un punto frío de forma

anormal puede indicar un bloqueo del torrente sanguíneo como el producido por la trombosis. Figura 8.

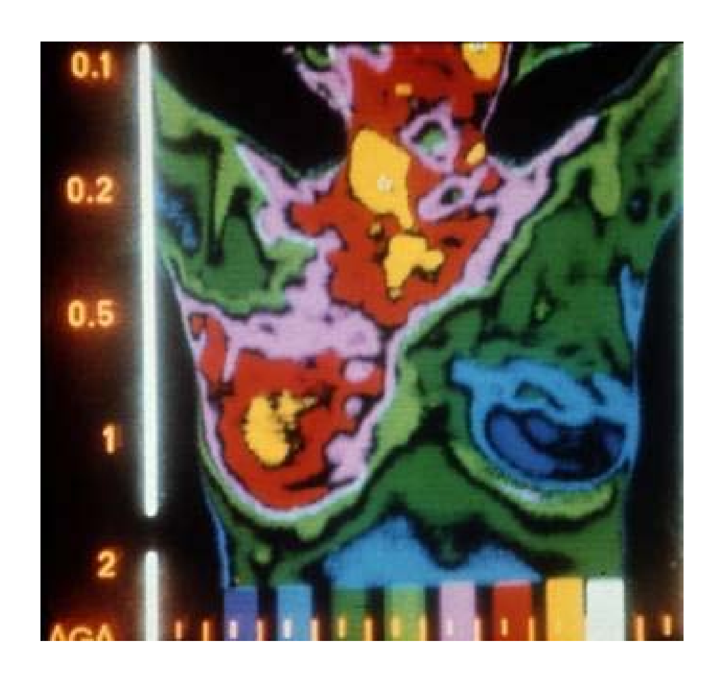


Figura 8- Termografía. En esta termografía, el tejido patológico (amarillo) contrasta con la coloración azul y verde del resto de los tejidos adyacentes

III.2-Criogenia

Criogenia es la técnica de producir muy bajas temperaturas. La historia de la criogenia data de 1840 en que se usó el frío (hielo) para el tratamiento de la malaria; en 1877 se logró licuar aire (- 196°C) y en 1908 se licuó hélio (-269°C). Uno de los problemas más difíciles de resolver fue el de guardar los líquidos a estas temperaturas, ya que por convección o por radiación aumentaban fácilmente su temperatura. Este problema fue resuelto por **James Dewar* en 1892 y el dispositivo inventado por él ahora lleva su nombre: dewar [131].

**James Dewar (1842-1923), químico y físico británico, conocido sobre todo por su trabajo en los fenómenos a baja temperatura. Inventó la vasija Dewar, la primera botella aislante o termo.*

Un *dewar* está hecho de vidrio plateado o de acero delgado para minimizar las pérdidas por conducción y por radiación, con vacío entre sus paredes para evitar las pérdidas de energía por convección. Figura 9



Figura 9- Vasija Dewar

III.3-Criocirugía y crioterapia

Una de las aplicaciones de mayor importancia, actualidad y trascendencia en las ciencias médicas es el uso de las bajas temperaturas en tratamientos de diferentes lesiones. El empleo de las bajas temperaturas en la medicina se denomina criocirugía o crioterapia.

La *Criocirugía* es un procedimiento que consiste en la aplicación de bajas temperaturas directa o indirectamente sobre la piel, causando una destrucción local de tejido de forma eficaz y controlada [132].

La *Crioterapia* es la aplicación del frío para provocar dilatación, contracción y otros efectos, destinados a tratar determinados padecimientos. En la Crioterapia no se destruyen los tejidos

Para lograr el efecto deseado, dependiendo del objetivo del tratamiento, se requiere conocer los mecanismo de acción de la crioterapia/ criocirugía. Al aplicar una cantidad media de frío

sobre la superficie de la piel, se produce una separación entre la epidermis y la dermis, permaneciendo la membrana basal intacta en las márgenes, respetando la capa fibrilar.

Al congelar la superficie de la piel, la temperatura de la célula desciende por debajo de cero grado, de modo que el agua se transforma en cristales de hielo y estos cristales, tanto a nivel intracelular como extracelular, producen un daño físico directo sobre la célula.

La mayor destrucción celular se produce al congelarse rápidamente el tejido y descongelarse lentamente. La reiteración de los ciclos de congelación y descongelación resultan más letales que uno solo prolongado.

Los cristales de hielo cuanto más grandes se forman más nocivos son. En el proceso de congelación-descongelación, los cristales pequeños pueden volver a recristalizarse y dar lugar a cristales de mayor tamaño y por tanto más nocivos. La muerte celular esta entre -25 º C y -50º C [132].

CAPÍTULO VII.

Radiaciones en medicina

I-Física de las radiaciones.

I.I-Aspectos fundamentales de física atómica y nuclear.

I.I.1-Estructura atómica

La materia es aquello que constituye la sustancia del universo físico. La Tierra, los mares, la brisa, el Sol, las estrellas, todo lo que el hombre contempla, toca o siente, es materia. También lo es el hombre mismo. La palabra materia deriva del latín *mater*, madre. La materia puede ser tan dura como el acero, tan adaptable como el agua, tan informe como el oxígeno del aire. A diferentes temperaturas puede presentar diferentes fases, pero

cualquiera que sea su forma, está constituida por las mismas entidades básicas, los átomos.

**Democriíto*, ***Leucipo* y ****Epicuro*, filósofos griegos, fueron los primeros en creer que la materia estaba constituida por partículas que denominaron átomos, palabra que significa "sin división", ya que consideraban el átomo como único e indivisible.

Se basaba, no en pruebas experimentales, sino en un razonamiento que puede sintetizarse así: *un trozo de metal puede cortarse en 2 pedazos y cada uno de éstos en dos pedazos más...; estos pueden dividirse sucesivamente hasta llegar a un momento en que se obtenga una partícula que ya no sea posible dividirla: el átomo*. Pensaban que los átomos tendrían formas y tamaños distintos: esféricos, cilíndricos, irregulares. Hacia el 1800, *****John Dalton* mostró que los átomos se unían entre sí en proporciones definidas. Las investigaciones demostraron que los átomos suelen formar grupos llamados moléculas (figura 1).

**Demócrito (460 a.C.-370 a.C.), filósofo griego que desarrolló la teoría atómica del universo.*
***Leucipo (c. 450-370 a.C.), filósofo griego, es reconocido como creador de la teoría atómica de la materia, más tarde desarrollada por su principal discípulo, el filósofo griego Demócrito.*
****Epicuro (341 a.C.-270 a.C.), filósofo griego, a su muerte dejó 300 manuscritos, incluyendo 37 tratados sobre física y numerosas obras sobre el amor, la justicia, los dioses y otros temas.*
*****John Dalton (1766-1844), químico y físico británico, que desarrolló la teoría atómica en la que se basa la ciencia física moderna.*

Cada molécula de agua, por ejemplo, está formada por un único átomo de oxígeno (O) y dos átomos de hidrógeno (H) unidos por una fuerza eléctrica denominada enlace químico, por lo que el agua se simboliza como HOH o H_2O. La molécula puede definirse como la parte más pequeña de un compuesto (sustancia pura formada por combinación de dos o más elementos químicos) que mantiene sus propiedades químicas [133].

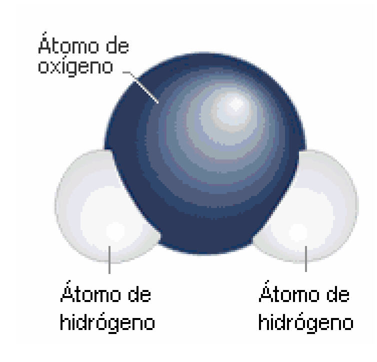


Fig.1- Molécula de H_2O

El estudio de los gases atrajo la atención del físico **Amedeo Avogadro*, que en 1811 formuló una importante ley que lleva su nombre. Esta ley afirma que dos volúmenes iguales de gases diferentes contienen el mismo número de moléculas si sus condiciones de temperatura y presión son las mismas. Si se dan esas condiciones, dos botellas idénticas, una llena de oxígeno y otra de helio, contendrán exactamente el mismo número de moléculas. Sin embargo, el número de átomos de oxígeno será dos veces mayor puesto que el oxígeno es diatómico. Las moléculas o compuestos diatómicos son aquellos que están formados por dos átomos del mismo elemento químico. Aunque el prefijo *di* sólo significa dos, normalmente se sobreentiende que la molécula tiene dos átomos del mismo elemento.

**Amedeo Avogadro, conde de Quaregna e Ceretto (1776-1856), físico y químico italiano que planteó la hipótesis conocida posteriormente como ley de Avogadro.*

I.I.1.a-Modelo atómico de Dalton

El modelo atómico de Dalton fue el primer modelo atómico con bases científicas. Este primer modelo atómico postulaba:

- La materia está formada por partículas muy pequeñas llamadas átomos, que son indivisibles y no se pueden destruir.
- Los átomos de un mismo elemento son iguales entre sí, tienen su propio peso y cualidades propias. Los átomos de los diferentes elementos tienen pesos diferentes.
- Los átomos permanecen sin división, aún cuando se combinen en las reacciones químicas.
- Los átomos, al combinarse para formar compuestos guardan relaciones simples.
- Los átomos de elementos diferentes se pueden combinar en proporciones distintas y formar más de un compuesto.
- Los compuestos químicos se forman al unirse átomos de dos o más elementos distintos.

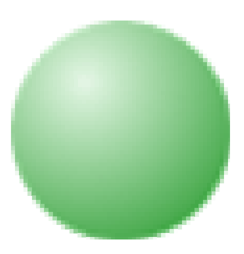


Figura 2-Modelo atómico de Dalton. La imagen del átomo expuesta por Dalton en su teoría atómica es la de minúsculas partículas esféricas, indivisibles e inmutables, iguales entre sí en cada elemento químico.

Sin embargo desapareció ante el modelo de **Thomson* ya que no explica los rayos catódicos, la radioactividad ni la presencia de los electrones (e-) o protones (p+).

I.I.1.b-Modelo atómico de Thompson

En 1897 Joseph John Thompson realiza una serie de experimentos y descubre el electrón. En tubos de gases a baja presión en los que se establece una diferencia de potencial superior a 10.000 voltios, se comprobó que aparecían partículas con carga eléctrica negativa a las que se llamó electrones y, demostró que habían sido arrancados de los átomos (los cuales eran neutros).Tal descubrimiento modificó el modelo atómico de Dalton, que lo consideraba indivisible [134]. Thompson supuso el átomo como una esfera homogénea e indivisible cargada positivamente en la que se encuentran incrustados los electrones. Figura 3

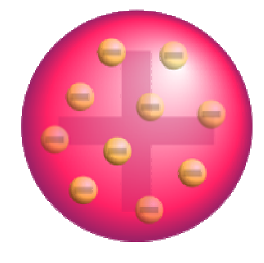


Figura 3- Modelo atómico de Thomson. Dedujo que el átomo debía de ser una esfera de materia cargada positivamente, en cuyo interior estaban incrustados los electrones.

**Joseph John Thomson (1856-1940), físico británico. En 1906 Thomson recibió el Premio Nóbel de Física por su trabajo sobre la conducción de la electricidad a través de los gases. Se le considera el descubridor del electrón por sus experimentos con el flujo de partículas (electrones) que componen los rayos catódicos. Teórico y un experimentador, Thomson elaboró en 1898 la teoría del pudín de ciruelas de la estructura atómica, en la que sostenía que los electrones eran como "ciruelas" negativas incrustadas en un "pudín" de materia positiva.*

I.I.1.c-Modelo atómico de Rutherford

Posteriormente otro físico inglés, **Ernest Rutherford*, realizó una serie de experimentos. Hizo incidir sobre una lámina finísima de oro un delgado haz de partículas cargadas positivamente de masa mucho mayores que el electrón y dotadas de energía cinética alta. En el choque observó distintos comportamientos:

- la mayoría atravesaban la lámina sin desviarse
- algunas se desviaban
- muy pocas retrocedían

Esta experiencia implicaba:

- que los átomos estaban casi vacíos, pues la mayoría de las partículas las atravesaban
- que hay una zona cargada positivamente, ya que algunas partículas retrocedían o se desviaban. Esta zona debe estar muy concentrada ya que es mayor el número de desviaciones que de choques.

Esto le condujo a proponer en 1911 un nuevo modelo atómico en el que se afirmaba que los átomos estaban constituidos por 2 zonas bien diferenciadas:

- Una de carga positiva con el 99,9% de la masa muy concentrada y por tanto de gran densidad a la que llamó núcleo.
- Otra rodeando al núcleo en forma de orbitales donde estaban los electrones con carga negativa girando alrededor del núcleo.

**Ernest Rutherford of Nelson (1871-1937), físico británico, premio Nóbel por su trabajo en física nuclear y por su teoría de la estructura del átomo.*

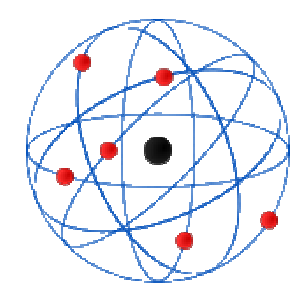


Figura 4- Modelo atómico de Rutherford. Dedujo que el átomo debía estar formado por un núcleo central cargado positivamente y electrones, de los que ya se sabía que formaban parte del átomo, viajaban en órbitas alrededor del núcleo

Sin embargo, el modelo de Rutherford presentaba fallos:

- Según la teoría clásica de electromagnetismo, una partícula eléctrica acelerada emite energía. El electrón girando en torno al núcleo está sometido a una aceleración centrípeta por lo que irradiaría energía, perdería velocidad y, por fin, caería al núcleo desestabilizando el átomo. Pero como el átomo de hecho es estable, las cosas no pueden ocurrir según el modelo de Rutherford.
- No explicaba los espectros.

I.I.1.d-Modelo atómico de Bohr

Para explicar la estructura del átomo, **Niels Bohr* desarrolló una hipótesis conocida como teoría atómica de Bohr.

**Niels Bohr (1885-1962), físico danés, galardonado con el Premio Nóbe 1922, hizo aportaciones fundamentales en el campo de la física nuclear y en el de la estructura atómica.*

Este supuso que los electrones están dispuestos en capas definidas o niveles cuánticos, a una distancia considerable del núcleo. La disposición de los electrones se denomina configuración electrónica. Figura 5

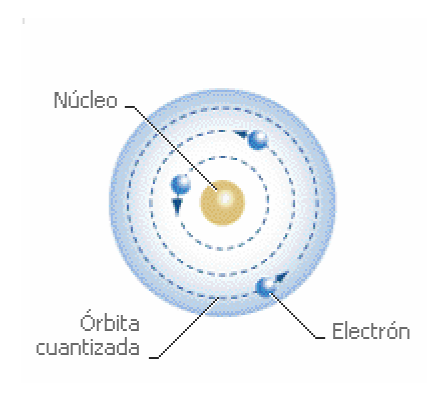


Figura 5- Átomo de Bohr

El número de electrones es igual al número atómico del átomo: por ejemplo el hidrógeno tiene un único electrón orbital, el helio dos y el uranio 92. Las capas electrónicas se superponen de forma regular hasta un máximo de siete y, cada una de ellas puede albergar un determinado número de electrones. La primera capa está completa cuando contiene dos electrones, en la segunda caben un máximo de ocho, y las capas sucesivas pueden contener cantidades cada vez mayores. Ningún átomo existente en la naturaleza tiene la séptima capa llena. Los "últimos" electrones, los más externos o los últimos en añadirse a la estructura del átomo, determinan el comportamiento químico de este.

Todos los gases inertes o nobles (helio, neón, argón, criptón, xenón y radón) tienen llena su capa electrónica externa. No se combinan químicamente en la naturaleza, aunque los tres gases nobles más pesados (criptón, xenón y radón) pueden formar compuestos químicos en el laboratorio. Por otra parte, las capas exteriores de los elementos como litio, sodio o potasio sólo contienen un electrón.

Estos elementos se combinan con facilidad con otros elementos (transfiriéndoles su electrón más externo) para formar numerosos compuestos químicos. De forma equivalente, a los elementos como el flúor, el cloro o el bromo sólo les falta un electrón para que su capa exterior esté completa. También se combinan con facilidad con otros elementos de los que obtienen electrones. Las capas atómicas no se llenan necesariamente de electrones de forma consecutiva. Los electrones de los primeros 18 elementos de la tabla periódica se añaden de forma regular, llenando cada capa al máximo antes de iniciar una nueva capa.[135]

A partir del elemento decimonoveno, el electrón más externo comienza una nueva capa antes de que se llene por completo la capa anterior.

No obstante, se sigue manteniendo una regularidad, ya que los electrones llenan las capas sucesivas con una alternancia que se repite. El resultado es la repetición regular de las propiedades químicas de los átomos, que se corresponde con el orden de los elementos en la tabla periódica. Resulta cómodo visualizar los electrones que se desplazan alrededor del núcleo como si fueran planetas que giran en torno al Sol. No obstante, esta visión es mucho más sencilla que la que se mantiene actualmente. Ahora se sabe que es imposible determinar exactamente la posición de un electrón en el átomo sin perturbar su posición. Esta incertidumbre se expresa atribuyendo al átomo una forma de nube en la que la posición de un electrón se define según la probabilidad de encontrarlo a una distancia determinada del núcleo. Esta visión del átomo como "nube de probabilidad" ha sustituido al modelo de sistema solar.

A mediados del siglo XIX, varios químicos se dieron cuenta de que las similitudes en las propiedades químicas de diferentes elementos suponían una regularidad que podía ilustrarse ordenando los elementos de forma tabular o periódica.

El químico ruso **Dmitri Mendeléiev* propuso una tabla de elementos llamada tabla periódica, en la que los elementos están ordenados en filas y columnas de forma que los elementos con propiedades químicas similares queden agrupados.

Según este orden, a cada elemento se le asigna un número (número atómico) de acuerdo con su posición en la tabla, que va desde el 1 para el hidrógeno hasta el 92 para el uranio, que tiene el átomo más pesado de todos los elementos que existen de forma natural en nuestro planeta. Como en la época de Mendeléiev no se conocían todos los elementos, se dejaron espacios en blanco en la tabla periódica correspondientes a elementos que faltaban. Las posteriores investigaciones, facilitadas por el orden de los elementos conocidos que ocupaban la tabla, llevaron al descubrimiento de los elementos restantes.

I.I.2-Radiactividad

En 1896 ***Becquere*l descubrió que ciertas sales de uranio emitían radiaciones espontáneamente, al observar que velaban las placas fotográficas envueltas en papel negro.

Hizo ensayos con el mineral en caliente, en frío, pulverizado, disuelto en ácidos y la intensidad de la misteriosa radiación era siempre la misma. Por tanto, esta nueva propiedad de la materia, que recibió el nombre de *radiactividad*, no dependía de la forma física o química en la que se encontraban los átomos del cuerpo radiactivo, sino que era una propiedad que radicaba en el interior mismo del átomo.

**Dmitri Ivánovich Mendeléiev (1834-1907), químico ruso conocido sobre todo por haber elaborado la tabla periódica de los elementos químicos.*

***Antoine Henri Becquerel (1852-1908), físico y premio Nóbel francés que descubrió la radiactividad del uranio. En 1903, Becquerel compartió el Premio Nóbel de Física con sus colegas franceses Pierre y Marie Curie por su trabajo sobre la radiactividad, término acuñado por Marie Curie*

El estudio del nuevo fenómeno y su desarrollo posterior se debe casi exclusivamente a los esposos **Curie*, quienes encontraron otras sustancias radiactivas como el torio, polonio y radio. La intensidad de la radiación emitida era proporcional a la cantidad de uranio presente, por lo que dedujo Marie Curie que la radiactividad era una propiedad atómica. El fenómeno de la radiactividad se origina exclusivamente en el núcleo de los átomos radiactivos. Es la propiedad que presentan los núcleos atómicos de ciertos isótopos de modificar espontáneamente su constitución, emitiendo simultáneamente una radiación característica.

La radiactividad puede ser:

- Radioactividad natural: Es la que manifiestan los isótopos que se encuentran en la naturaleza.
- Radiactividad artificial o inducida: Es la que ha sido provocada por transformaciones nucleares artificiales

I.I.3-Isótopos

La palabra isótopo, del griego "en el mismo sitio", es una de las dos o más variedades de un átomo que tienen el mismo número atómico, constituyendo por tanto el mismo elemento, pero que difieren en su número másico o índice de masa. (Figura 6)

**Marie y Pierre Curie (1867-1934) y (1859-1906), matrimonio de físicos franceses, premiados con el Nóbel, que descubrieron conjuntamente los elementos químicos radio y polonio. El estudio del matrimonio Curie de los elementos radiactivos contribuyó a la comprensión de los átomos en los que se basa la física nuclear moderna*

En el lenguaje común es habitual utilizar la palabra isótopo para referirse a cada especie caracterizada por un conjunto dado de valores **Z** y **A**.

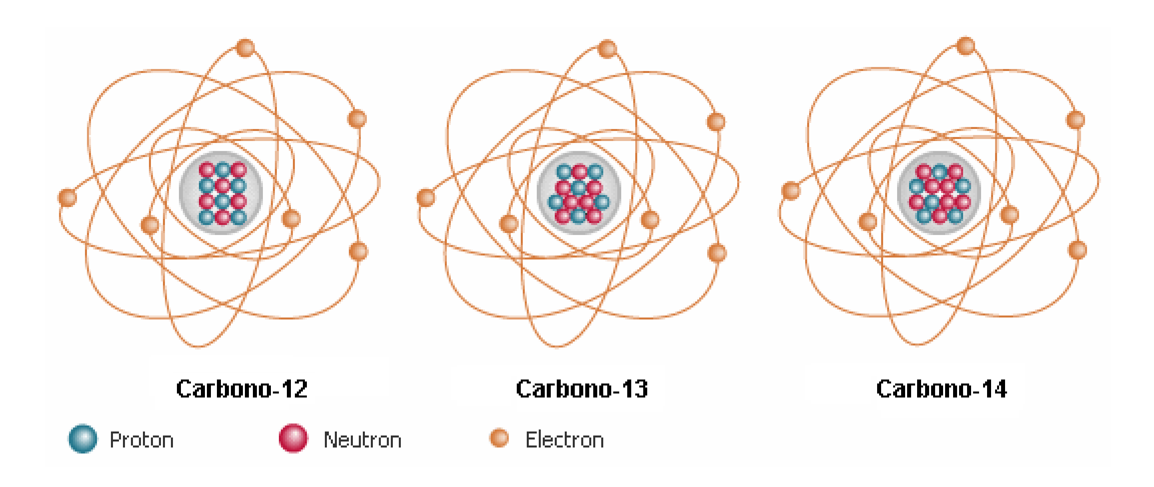


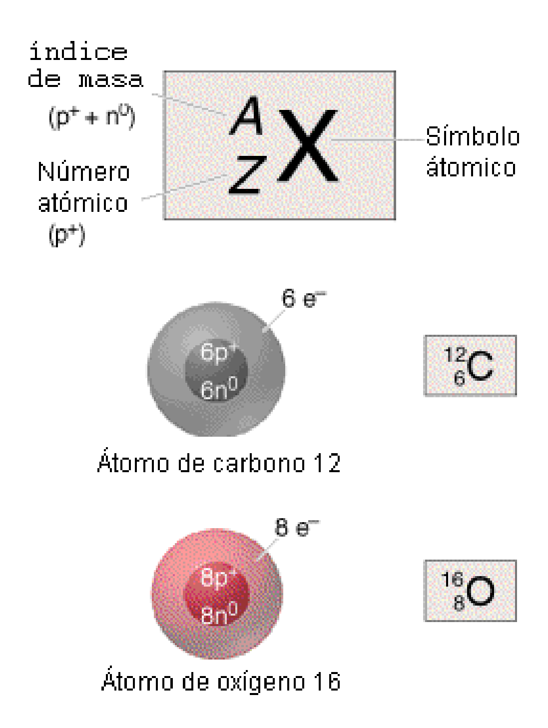
Figura 6- Isótopos de carbono

Estrictamente, tal especie debería ser denominada nucleido, y reservarse la palabra isótopo para los nucleidos ó núclidos que pertenecen a un mismo elemento. Así, los nucleidos carbono-12 y carbono-14 son isótopos del elemento carbono. El número que indica la masa atómica se representa por **A** mayúscula y el que indica el número atómico se representa por una **Z** mayúscula. El número másico o índice de masa, es la suma del número de protones y neutrones contenidos en el núcleo de un átomo. Los átomos de un mismo elemento pueden tener diferentes números másicos, según el isótopo de que se trate y el número atómico es igual a la cantidad de protones que existen en el núcleo y a la cantidad de electrones en caso que sea neutro, o sea, que exista la misma cantidad de protones que electrones en el átomo. [136]

$Z = P$ ó (e) Número atómico $A = P + N$ Índice de masa

Los isótopos del mismo elemento sólo difieren entre ellos en el número de neutrones que contienen. El número atómico es característico de cada elemento químico y representa una propiedad fundamental del átomo: su carga nuclear [137].

Una anotación aceptada para indicar el número y la masa atómica de un núcleo es colocando la masa atómica en la parte superior izquierda del símbolo (**X**) del elemento, y el número atómico en la inferior izquierda.



Los núclidos se agrupan según compartan una u otra característica, tal y como aparece en la siguiente tabla 1.

Núclidos	***Características***	***Ejemplo***
ISÓTOPOS	núclidos con el mismo número atómico y distinto número másico	$_1{}^1H$ y $_1{}^3H$
ISÓTONOS	núclidos con el mismo número de neutrones	$_{11}{}^{23}Na$ y $_{12}{}^{24}Mg$
ISÓBAROS	núclidos con la misma masa atómica	$_6{}^{14}C$ y $_7{}^{14}N$
ISÓMEROS	núclidos con el mismo número y masa atómica pero con distinto estado energético. Los isómeros se distinguen añadiendo una "m" al número másico	$_9{}^{19}F$ y $_9{}^{19m}F$

Tabla 2- Agrupación de los núclidos

Únicamente ciertas combinaciones de **Z** y **A** forman núcleos estables; si hay demasiados neutrones o muy pocos, el núcleo sufrirá más tarde o más temprano un cambio. Este cambio se denomina *desintegración radiactiva.*

En 1902 Ernest Rutherford y **Frederick Soddy*, sugirieron que el ritmo con que una sustancia radiactiva emitía radiación disminuía exponencialmente con el tiempo.

La desintegración de un núcleo cualquiera se produce al azar y, el número de núcleos que se desintegran en un intervalo de tiempo **dt** es directamente proporcional al tiempo y al número de núcleos existentes. La actividad **A** es proporcional al número de núcleos **N** presente en la muestra radiactiva en un instante dado, a través de la constante de decaimiento:

$$A = \lambda N.$$

Como actividad implica transmutación nuclear, al ir decayendo la muestra con el tiempo, el número **N** va disminuyendo con una rapidez **-dN/dt**. El signo negativo indica disminución de **N** al avanzar el tiempo **t**. Por lo tanto,

$$A = -dN/dt = \lambda N$$

**Frederick Soddy (1877-1956), químico británico, premiado con el Nóbel en 1921. Junto con el físico Ernest Rutherford comenzó a investigar las transformaciones radiactivas de los núcleos atómicos y finalmente desarrolló una teoría de la estructura atómica. Soddy es conocido ante todo por sus investigaciones sobre el origen y naturaleza de los isótopos*

La expresión matemática de la desintegración de un núcleo es:

N(t)- número de núcleos radiactivos en un instante **t**

dN -número de desintegraciones en el tiempo **t**

$$-dN = \lambda N dt$$

$$dN / N = - \lambda dt$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Donde **N** es el número de núcleos que quedan sin desintegrar, N_0 es el número de núcleos iniciales, y $N_0 - N$ es el número de núcleos desintegrados. La constante lambda **λ** es la ***constante de desintegración****.* El fenómeno de la radiactividad es aleatorio sujeto a una cierta probabilidad de desintegración. Por eso **λ** es la probabilidad por unidad de tiempo de que los núcleos pertenecientes a esa población se desintegren.

I.I.4-Período de semidesintegración.

El período de semidesintegración $T_{1/2}$, es el tiempo que tarda una muestra radiactiva en desintegrar la mitad de sus átomos. O sea, ceder la mitad de toda su energía.

$$N = N_0 / 2$$

$$N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Se define también la ***vida media*** como el tiempo que tarda un núcleo en desintegrarse:

$$\tau \text{ (tau)} = 1 / \lambda \text{ (lambda)}$$

En la tabla 2 aparecen los períodos de semidesintegración de algunos isótopos radiactivos.

Isótopo radiactivo	*Período de semidesintegración*
Berilio-8	10^{-16} s
Polonio-213	4.10^{-6} s
Aluminio-28	2.25 minutos
Yodo-131	8 días
Estroncio-90	28 años
Radio-226	1600 años
Carbono-14	5730 años
Rubidio-87	$5.7\ 10^{10}$ años

Tabla 2

I.I.5-Emisiones radiactivas.

Un isótopo radiactivo de un elemento se caracteriza por tener un núcleo atómico inestable (por el balance entre neutrones y protones) y emitir energía cuando cambia de esta forma a una más estable. No todos los isótopos de un elemento son radioactivos [137]. Figura 7

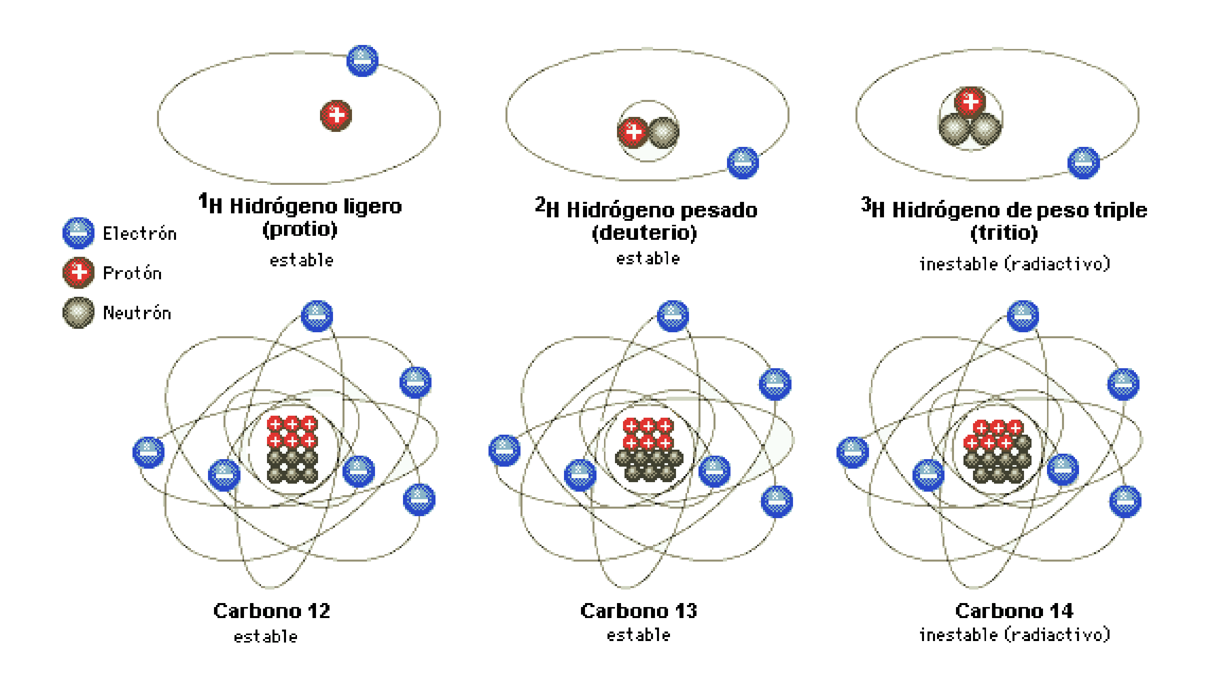


Figura 7- Isótopos estables e inestables de átomos de hidrógeno y carbono

Los núcleos atómicos inestables se desintegran espontáneamente, emitiendo distintos tipos de radiaciones. Figura 8.

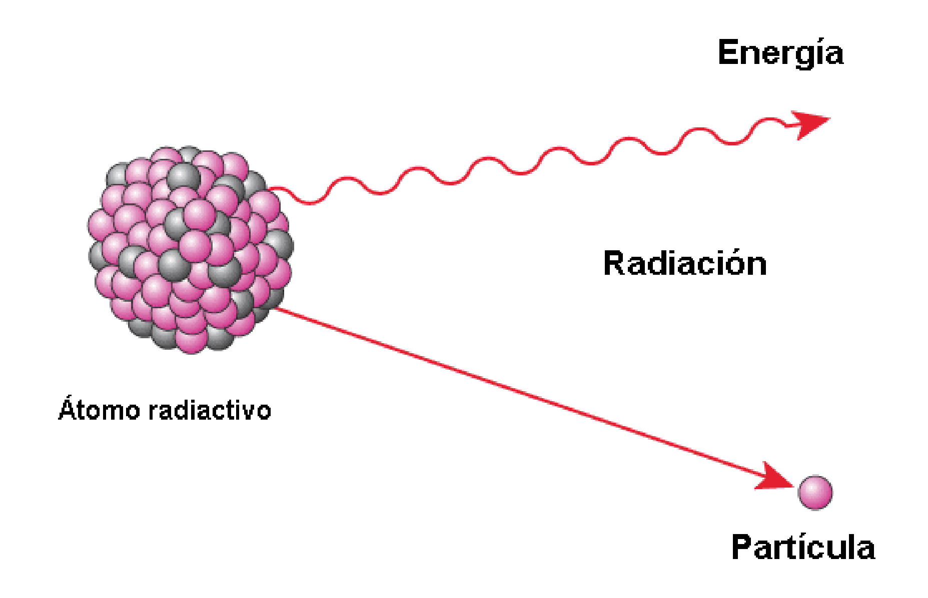


Figura 8-Representación esquemática de la emisión de radiación por un átomo inestable.

I.I.5.a-Desintegración Alfa

Un núcleo demasiado pesado para ser estable expulsa un grupo compacto (una partícula alfa), consistente en dos protones y dos neutrones, que deja al núcleo con una **A** cuatro unidades menor y una **Z** dos unidades más bajas, es decir, dos pasos atrás en la tabla periódica. Estructuralmente una partícula alfa α es idéntica a un núcleo de Helio – 4 (están formadas por 2 protones y 2 neutrones) Figura 9.

$$ {}_{Z}^{A}X \text{ ----> } {}_{Z-2}^{A-4}H + He^{2+} $$

Como ejemplo tendríamos las siguientes desintegraciones:

$$ {}^{235}U \text{ -----> } {}^{231}Th + He^{2+} $$

$$ {}^{226}Ra \text{ ----> } {}^{222}Rn + He^{2+} $$

$$ {}^{210}Po \text{ ----> } {}^{206}Pb + He^{2+} $$

La desintegración alfa **α** es frecuente entre los elementos naturales más pesados (uranio, polonio y radio, por ejemplo), pero no conduce directamente a núcleos estables: antes se producen isótopos intermedios que experimentan nuevas desintegraciones.

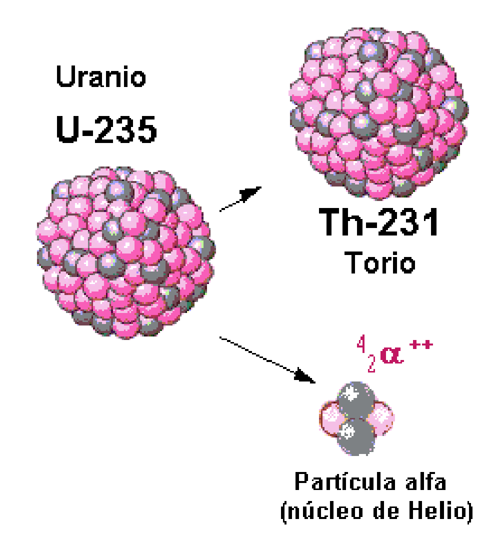


Figura 9- Desintegración Alfa (α)

Las partículas alfa tienen una energía de hasta 5.000.000 de **electronvoltios*, pero son tan voluminosas que sólo pueden atravesar unos 25 mm de aire y se ven detenidas por una simple hoja de papel o por la parte más externa de la piel humana (Figura 10). Sin embargo, por esta misma razón produce serios daños en el interior del cuerpo humano cuando son emitidas por materiales alfa – activos absorbidos inadvertidamente como polvo transportado por el aire, o través de heridas contaminadas. Los emisores naturales de partículas alfa, como el radio, son de uso práctico limitado, ahora que se dispone libremente de gran variedad de radioisótopos artificiales.

**Electronvoltio, unidad de energía utilizada en Física para medir la energía de iones y partículas subatómicas acelerados en los aceleradores de partículas. Un electronvoltio es la energía adquirida por un electrón al atravesar una diferencia de potencial de 1 voltio; equivale a 1,60207 × 10^{-19} julios. Generalmente suelen expresarse las energías en millones de electronvoltios (megaelectronvoltios o MeV) o miles de millones de electronvoltios (gigaelectronvoltios o GeV).*

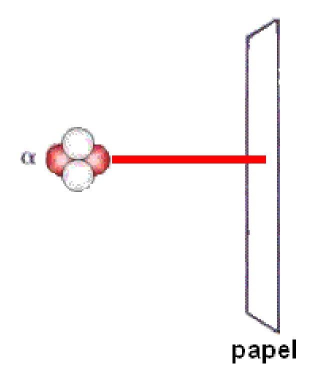


Figura 10- Radiación por partícula α detenida por una hoja de papel

I.I.5.b-Dsintegración Beta

Su poder de penetración es mayor que las alfa. Son frenadas por metros de aire, una lámina de aluminio o unos cm de agua. Figura 11.

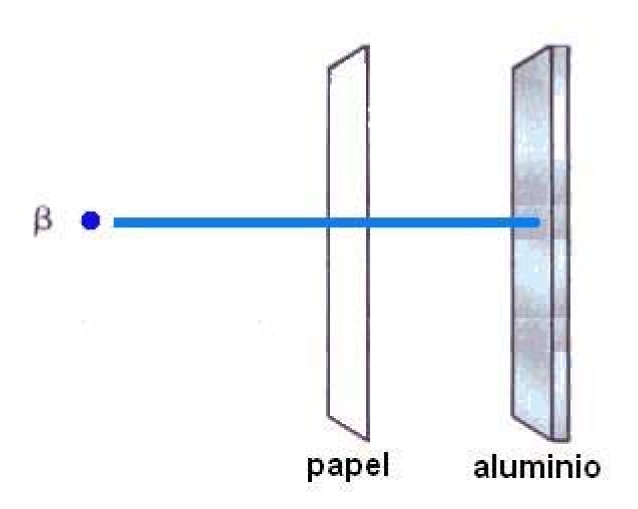


Figura 11- Poder de penetración de la radiación β

Existen tres tipos de radiación beta:

- Radiación Beta menos
- Radiación Beta más
- Captura electrónica

Radiación β^-

Aparece para cualquier tipo de núcleo, pero es típica de núcleos con exceso de neutrones, es decir **N >Z**. Es un mecanismo usado por los núcleos para llegar a la línea de estabilidad (N aproximadamente igual Z) [138]. Las partículas β^- son electrones de origen nuclear. Estos electrones se originan por la desintegración de un neutrón nuclear:

$$^{1}_{0}\textbf{neutrón} \rightarrow {}^{1}_{+1}\textbf{protón} + {}^{0}_{-1}\textbf{electrón}\ (\beta^-)$$

En 1934 **Fermi* explicó esta radiación suponiendo que en la desintegración beta menos, un neutrón se transforma en un protón, un electrón y un antineutrino mediante la reacción:

$$\mathbf{n^0 \text{ ----> } p^+ + e^- + \text{antineutrino}}$$

Así, el elemento que sufre una desintegración de tipo β^- transforma uno de sus neutrones en un protón, con lo que su número atómico aumenta en una unidad (se convierte, por tanto, en otro elemento químico), aunque su masa no varía. Figura 12.

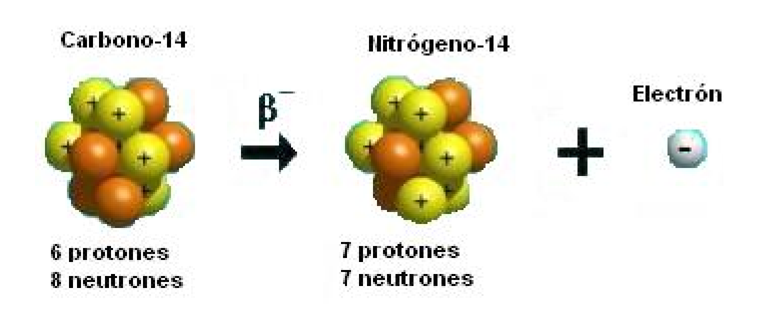
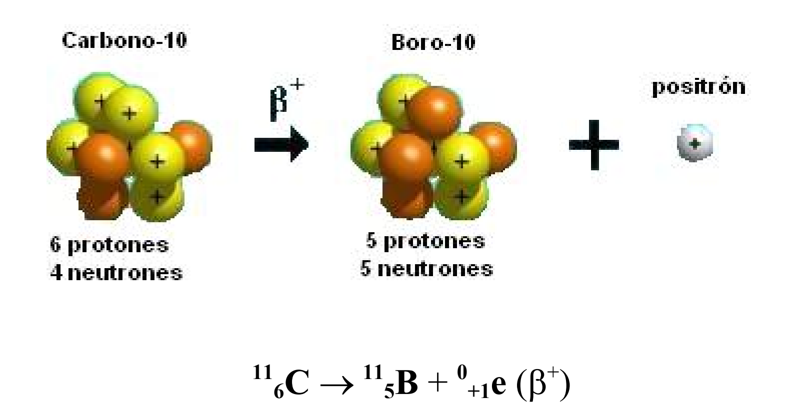


Figura 12- Desintegración tipo β-

**Enrico Fermi (1901-1954), físico y premio Nóbel 1938 italiano, conocido por haber llevado a cabo la primera reacción nuclear controlada. También desarrolló una teoría sobre la desintegración radiactiva beta, y desde 1934 investigó la radiactividad artificial bombardeando elementos con neutrones*

Radiación β⁺

Mediante este mecanismo un núcleo emite espontáneamente positrones, e^+, antipartículas del electrón de igual masa pero con carga eléctrica opuesta. Figura 13. [138]



$$^{11}_{6}\mathbf{C} \rightarrow {}^{11}_{5}\mathbf{B} + {}^{0}_{+1}\mathbf{e}\ (\beta^+)$$

Figura 13- Desintegración tipo β+

Lo que ocurre es que un protón del núcleo se desintegra dando lugar a un neutrón, un positrón o partícula $Beta^+$.

$$^{1}_{+1}\mathbf{protón} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathbf{neutrón} + {}^{0}_{+1}\mathbf{electrón}\ (\beta^+)$$

Así el núcleo se desprende de los protones que le sobran y se acercan a la línea de estabilidad N = Z. Por ello se da en núcleos con exceso de protones. [139]

La reacción sería:

$$_{Z}^{A}X \text{ ----> } {}_{Z-1}^{A}Y + e^+ + \text{neutrino}$$

Algunos ejemplos son:

$$^{30}P \text{ ----> } {}^{30}Si + e^+$$

$$^{40}K \text{ ----> } ^{40}Ar + e^{+}$$

$$^{53}Fe \text{ ----> } ^{53}Mn + e^{+}$$

I.I.6-Interacción de las partículas α y β con las sustancias

La transferencia de energía entre las partículas cargadas y los átomos o moléculas ocurre, fundamentalmente por medio de dos fenómenos: ionización y excitación [140].

Cuando una partícula cargada pasa cerca de una átomo, entre ella y los electrones orbitales externos pueden actuar fuerzas electromagnéticas. Como consecuencia dichos electrones son atraídos o repelidos por la partícula cargada, según sea el signo de su carga, por lo que en ambos casos reciben una cierta cantidad de energía. La energía recibida por un electrón puede ser tan elevada que supere a la energía que lo mantiene ligado al átomo en su órbita electrónica, en cuyo caso dicho electrón escapará. Este fenómeno se conoce con el nombre de ***ionización*** y la energía necesaria para expulsar al electrón del su órbita se le llama potencial de ionización. El átomo que ha perdido un electrón queda con una carga positiva y forma junto con el electrón un par de iones. Cuando la energía recibida por el electrón resulta insuficiente para que escape del átomo, tiene lugar el fenómeno de ***excitación****.* El electrón adquiere dentro del átomo un nivel superior de energía y pasa a una órbita más alejada del núcleo y, al caer nuevamente a su estado inicial, el átomo emite la diferencia de energía entre ambos estados en forma de un fotón con una longitud de onda característica

Las partículas alfa (y otros iones pesados) tienen carga positiva. Al penetrar la materia atraen a su paso eléctricamente a los electrones cercanos, produciendo ionización de estos átomos. Pierden una pequeña fracción de su energía en cada ionización producida, frenándose gradualmente hasta llegar al reposo. Cuando su velocidad ya se ha reducido de

manera sensible, atrapan electrones del material y finalmente se detienen, constituyendo átomos extraños de helio dentro del material.

Dado que su masa es mucho mayor que la de los electrones que se encuentran a su paso, su trayectoria es esencialmente recta. Sólo muy ocasionalmente chocan con un núcleo y se produce una desviación. Como son fuertemente ionizantes, pierden su energía cinética pronto, y el alcance de las partículas alfa en cualquier material es mucho menor que el de las otras radiaciones. Además, el alcance es mayor mientras mayor es la energía de la partícula. En sólidos es típicamente de unas micras. Las partículas alfa provenientes de una fuente radiactiva y tienen todas el mismo alcance, en virtud de que son monoenergéticas.

Los electrones energéticos (y las partículas betas negativas) tienen carga eléctrica, y su masa es la misma que la de los electrones atómicos que se encuentran a su paso. De hecho son indistinguibles de los electrones del material. Así como las partículas alfa, van avanzando y perdiendo energía al ionizar y excitar los átomos del material, hasta frenarse totalmente, pero con la diferencia de que sus trayectorias no son líneas rectas y, por lo tanto, su alcance no está tan bien definido como en el caso de las alfas.

Esto se debe a que en choques entre partículas de la misma masa puede haber desviaciones importantes de la dirección inicial. El alcance de electrones de MeV de energía en sólidos es típicamente de unos milímetros y, en aire es de unas decenas de centímetros. Cuando han perdido toda su energía se detienen, constituyendo entonces una carga eléctrica extra colocada dentro del material, confundiéndose con los demás electrones. Como las betas provenientes de una fuente radiactiva no son monoenergéticas (por la energía que se lleva el neutrino) y, su alcance es variado. Cuando un electrón energético se avecina a un núcleo, es desviado bruscamente por la gran carga eléctrica del núcleo. Este desvío provoca la emisión de un fotón de rayos X, cuya emisión se denomina radiación de frenado o *bremsstrahlung* y, es un mecanismo considerable de pérdida de energía de los

electrones. El desvío es más importante entre mayor sea el número atómico Z del material frenador. Es lo que produce la radiación proveniente de un tubo generador de rayos X. [141]

Los positrones siguen esencialmente el mismo proceso de frenado que los electrones negativos, salvo al final de su trayectoria. Siendo antimateria, no pueden existir por mucho tiempo en un mundo de materia. El proceso normal que sufren una vez que se han frenado casi totalmente es el siguiente. En virtud de que tienen carga positiva, se asocian temporalmente a un electrón del material, formando un "átomo" llamado positronio, en el que el electrón y el positrón giran uno alrededor del otro.

El positronio tiene una vida media del orden de 10^{-10} segundos. Luego se aniquilan las dos partículas, emitiendo radiación electromagnética (rayos gamma). Las masas del electrón y del positrón son de 0.51 MeV cada uno, así que hay 1.02 MeV disponibles al aniquilarse. Normalmente se emiten dos rayos gamma, cada uno de 0.51 MeV; ésta se llama *radiación de aniquilación.*

I.I.7.-Captura electrónica (desintegración k)

La desintegración K corresponde a la captación por parte del núcleo de un electrón de los orbitales, con lo que su número atómico disminuye en una unidad, sin que varíe su masa. En este caso, un protón se combina con un electrón de los orbitales para formar un neutrón:

$$^{1}_{+1}\textbf{protón} + {}^{0}_{-1}\textbf{electrón} \rightarrow {}^{1}_{0}\textbf{neutrón}$$

Este tipo de radiación suele ir acompañado de la emisión de rayos-X.

$$^{55}_{26}\textbf{Fe} + {}^{0}_{-1}\,\textbf{e} \rightarrow {}^{55}_{25}\textbf{Mn}\ \text{(emisión K)}$$

I.I.8-Rayos gamma γ

Los rayos γ son radiaciones electromagnéticas producidas por la radioactividad o procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. Estabilizan el núcleo sin cambiar su contenido de protones. Normalmente la radiación suele acompañar a otro tipo de emisión. Penetran más profundamente que la radiación **α** ó **β** [142]. Figura 14

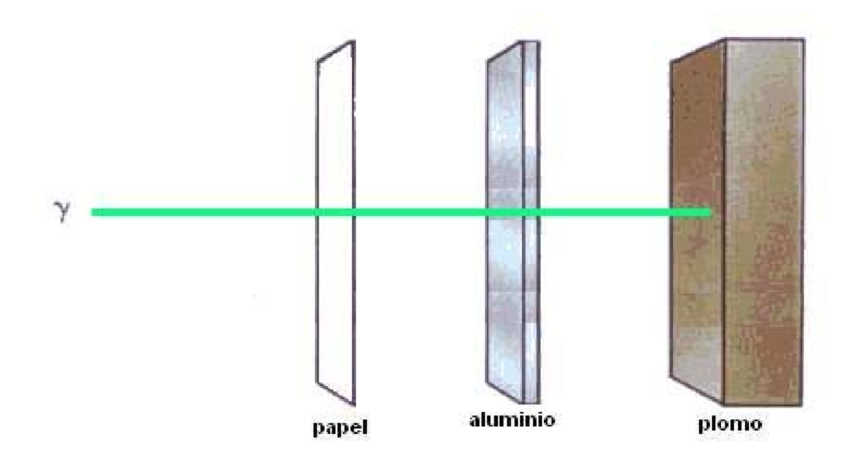


Figura 14- Poder de penetración de la radiación gamma

En este tipo de radiación el núcleo no pierde su identidad. Mediante esta radiación el núcleo se desprende de la energía que le sobra para pasar a otro estado de energía más baja.

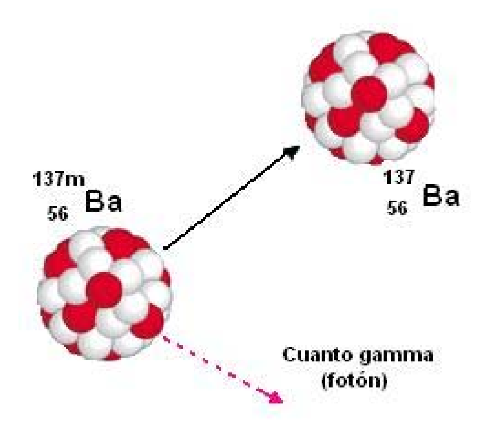


Figura 15- Radiación γ gamma

Muchos isótopos naturales y artificiales con actividad alfa y beta son también emisores de rayos gamma. Los rayos gamma son una radiación electromagnética como los rayos X.

Su intensidad se reduce al pasar a través de la materia en un grado que dependerá de su propia energía y de la densidad física del material absorbente. Los rayos gamma no son detenidos como las partículas alfa o beta, ni existen materiales opacos a ellos, como en el caso de la luz. Pueden necesitarse entre 5 y 25 centímetros de plomo o hasta 3 m de hormigón para conseguir una protección adecuada contra los rayos gamma de alta energía.

La partícula alfa o beta primaria y su rayo gamma asociado se emiten casi simultáneamente. Sin embargo, se conocen algunos casos de emisión alfa o beta pura, es decir, procesos alfa o beta no acompañados de rayos gamma y también se conocen algunos isótopos que emiten rayos gamma de forma pura.

Esta emisión gamma pura tiene lugar cuando un isótopo existe en dos formas diferentes, los llamados isómeros nucleares, con el mismo número atómico y número másico pero distintas energías. La emisión de rayos gamma acompaña a la transición del isómero de mayor energía a la forma de menor energía.

Estos rayos se emiten con energías perfectamente determinadas, pero en muchos casos los espectros son muy complejos, dado que a menudo un mismo isótopo emite muchos rayos gamma de diferentes energías. Los rayos gamma poseen la misma naturaleza que las ondas de radi0, rayos infrarrojos, luz visible y rayos ultravioletas, de los cuales se diferencian únicamente en su longitud de onda y su origen. Un rayo X se diferencia de un rayo gamma de la misma energía en su origen [142].

Cuando un rayo gamma pasa a través de la materia, la probabilidad de absorción en una capa fina es proporcional a la delgadez de dicha capa, lo que lleva a un decrecimiento exponencial de la intensidad.

$$I(d) = I_0 \cdot e^{(-\mu d)}$$

Aquí, **$\mu = n \times \sigma$** es el coeficiente de absorción, medido en cm^{-1}, ***n*** el número de átomos por cm^3 en el material, ***σ*** el espectro de absorción en cm^2 y ***d*** la delgadez del material en cm.

Al propagarse en el espacio, las ondas electromagnéticas son representadas gráficamente en forma sinusoidal. (ver en capítulo III)

En el caso de los núcleos más pesados, con mucha frecuencia estos emiten su energía de excitación en grupos monoenergéticos de electrones de las capas más internas, en lugar de hacerlo en forma de rayos gamma. Este fenómeno se conoce con el nombre de *conversión interna* y los electrones emitidos electrones de conversión (el electrón absorbe las radiaciones gamma). La energía de los distintos grupos de electrones de conversión es igual a la energía de excitación del núcleo, menos la energía de unión del electrón en su órbita. Una consecuencia del proceso de conversión interna es la emisión de rayos X característicos, al llenarse los huecos vacíos dejados por los electrones de conversión emitidos [143].

I.I.9.-Interacción de la radiación gamma con la sustancia

Las radiaciones electromagnéticas, por carecer de masa y carga eléctrica, interacciona con la materia de forma distinta a como lo hacen las partículas cargadas. Los fotones se clasifican de acuerdo con su origen y no con su energía, pero todos ellos, ya sean rayos gamma, bremsstrahlung (espectro continuo de rayos X), rayos X característicos o radiación

aniquilamiento de los positrones, interaccionan con la materia a través de unos procesos que son independientes de su origen y que, por el contrario, dependen solo de su energía cuántica y de la naturaleza del medio donde se produce la interacción [144].

En su paso a través de la sustancia, los rayos gamma son absorbidos o dispersados por diferentes procesos de interacción en los cuales intervienen los electrones y núcleos de los átomos. Como consecuencia de estos procesos de interacción, los fotones pueden sufrir una absorción completa , en la que toda su energía se transfiere a los electrones o núcleos atómicos - un fenómeno de dispersión inelástica también llamado dispersión incoherente - en cuyo caso el fotón cede una parte de su energía y experimenta un cambio de dirección , o bien un fenómeno de dispersión elástica o dispersión coherente , según el cual el fotón no pierde energía , pues solamente cambia su dirección.

De todos los procesos de interacción de los fotones con la sustancia, los que más interezan por ser los que se presentan con mayor probabilidad dentro del intervalo de energías más frecuentes de los rayos gamma (0.01 a 10 Mev), son los siguientes:

- Efecto fotoeléctrico
- Efecto Compton
- Producción de pares

I.I.9.a-Efecto fotoeléctrico

Describe cuando un fotón gamma interactúa con un electrón atómico y le transfiere su energía, expulsando a dicho electrón del átomo.

La energía cinética del electrón liberado es igual a la energía del fotón incidente menos la energía de enlace que tenía el fotoelectrón:

$$T_e = E\,\gamma - B_e$$

La probabilidad de absorción de un fotón por efecto fotoeléctrico es difícil de calcular, pero a partir de los resultados experimentales se conocen sus principales características:

- Es más significativa para bajas energías (~100 keV).
- Aumenta rápidamente con el número atómico Z del material absorbente.
- Decrece rápidamente con la energía del fotón.
- Aumenta bruscamente y de forma discontinua cuando la energía coincide con la energía de ligadura de alguna capa atómica.

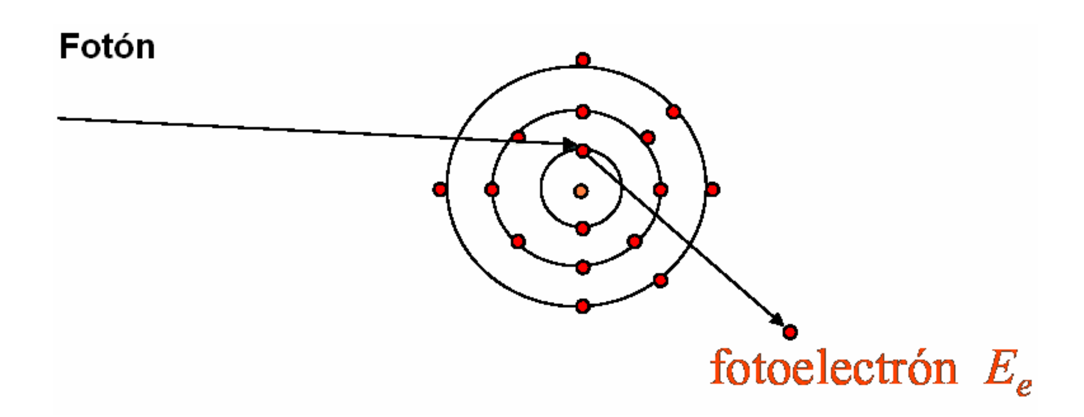


Figura 16- Representación esquemática de Efecto fotoeléctrico.

La absorción fotoeléctrica de los rayos gamma sólo puede tener lugar por interacción con electrones fuertemente ligados al átomo. Cuando la energía de unión de los electrones puede considerarse despreciable en comparación con la energía de los fotones incidentes, aquellos se compartan prácticamente como electrones libres. Esto sucede con los electrones de los átomos ligeros y con los de las órbitas externas de los átomos más pesados, donde la energía de unión no llega a 1 Kev. Se puede esperar que el efecto fotoeléctrico será tanto más probable cuando más firmemente unido se encuentre el electrón al átomo [145].Cuando un átomo absorbe un fotón por un proceso fotoeléctrico, queda

con un puesto vacante en la capa de donde el electrón ha sido expulsado, por consiguiente, el átomo emitirá en el proceso fotoeléctrico, además del electrón, un rayo X característico de una energía igual a B_e.

I.I.9.b-Efecto Compton

El efecto Compton fue estudiado por el físico **Arthur Compton* en 1923 quién pudo explicarlo utilizando la noción cuántica de la radiación electromagnética como cuantos de energía [146].

Este fenómeno se refiere a la interacción donde un fotón gamma incidente hace ganar suficiente energía a un electrón atómico como para provocar su expulsión. Con la energía restante del fotón original se emite un nuevo fotón gamma de baja energía con una dirección de emisión diferente a la del fotón gamma incidente. La probabilidad del Efecto Compton decrece según la energía del fotón se incrementa. El Efecto Compton se considera que es el principal mecanismo de absorción de rayos gamma en el rango de energía intermedio entre 100 keV a 10 MeV (Megaelectronvoltio), un rango de energía que incluye la mayor parte de la radiación gamma presente en una explosión nuclear. El efecto Compton es relativamente independiente del número atómico del material absorbente. Figura 17

**Arthur Holly Compton (1892-1962), físico y premio Nóbel estadounidense, cuyo estudio de los rayos X le llevó a descubrir en 1922 el denominado efecto Compton. El descubrimiento de este efecto confirmó que la radiación electromagnética tiene propiedades tanto de onda como de partícula, un principio central de la teoría cuántica.*

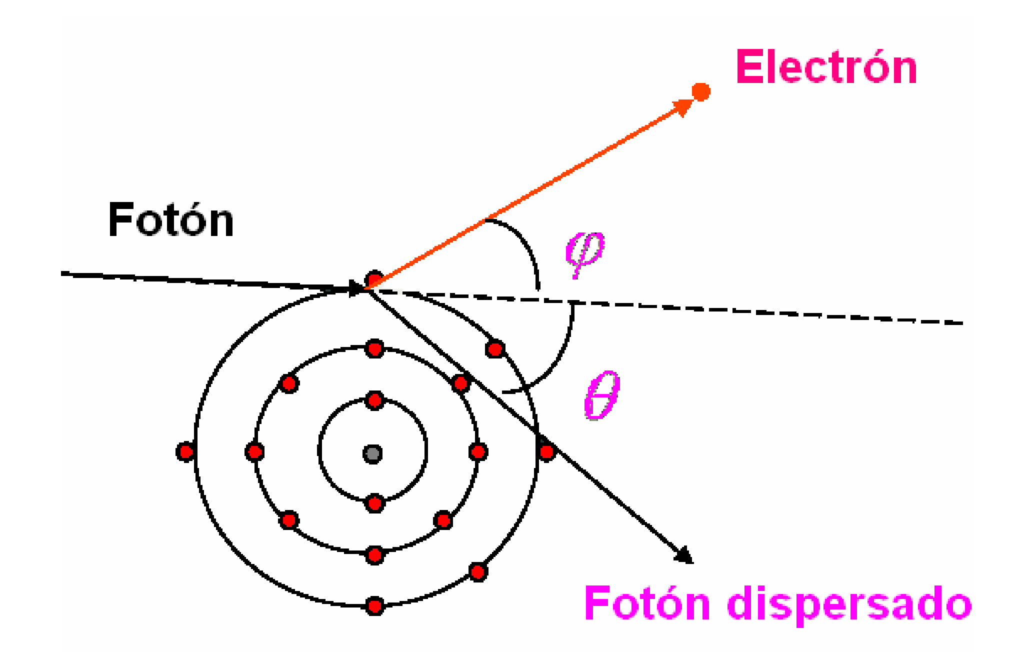


Figura 17-Representación esquemática del efecto Compton

Todas las peculiaridades del efecto Compton pueden explicarse fácilmente si se atribuye a la radiación gamma una naturaleza corpuscular, de forma que, además de la energía del fotón, tenga también que considerarse un impulso o momento. Es decir, según esto, los fotones se manifiestan como una bola de una cierta masa en movimiento y, al chocar con un electrón atómico, se produce un intercambio, tanto de energía como de impulso ligado a dichos fotónes. La colisión solo puede tener lugar con electrones libres o débilmente unidos al átomo a diferencia del efecto fotoeléctrico que solo ocurre con electrones fuertemente unidos al átomo.

El efecto Compton constituyó la demostración final de la naturaleza cuántica de la luz tras los estudios de **Planck* sobre el cuerpo negro y la explicación de ***Albert Einstein* del efecto fotoeléctrico.

I.I.9.c-Producción de pares

Como se ha indicado anteriormente, la probabilidad de la absorción fotoeléctrica disminuye rápidamente al aumentar la energía de los fotones, a partir de 0.1 Mev. De la misma forma la probabilidad del efecto Compton se reduce al aumentar la energía de los fotones si bien más lentamente que el efecto fotoeléctrico. En cambio para fotones de elevada energía entra en juego un tercer proceso de interacción, conocido con el nombre de producción de pares.

Debido a la interacción de la fuerza de ****Coulomb* y, cuando un fotón tiene una energía mayor a 1.02 MeV, este puede interaccionar con un núcleo atómico, la energía del fotón incidente se convierte espontáneamente en la masa de un par electrón-positrón. Un positrón es la antipartícula equivalente a un electrón; tiene la misma masa de un electrón, pero tiene una carga positiva de igual fuerza que la carga negativa de un electrón.

**Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), físico alemán, premiado con el Nobel, considerado el creador de la teoría cuántica.*

***Albert Einstein (1879-1955), físico alemán nacionalizado estadounidense, premiado con un Nobel, famoso por ser el autor de las teorías general y restringida de la relatividad y por sus hipótesis sobre la naturaleza corpuscular de la luz. Es probablemente el científico más conocido del siglo XX.*

****Charles de Coulomb (1736-1806), físico francés, pionero en la teoría eléctrica. Coulomb pudo establecer el principio, conocido ahora como ley de Coulomb, que rige la interacción entre las cargas eléctricas.*

La energía excedente del equivalente a la masa en reposo de las dos partículas (1,02 MeV) aparece como energía cinética del par y del núcleo. El positrón tiene una vida muy corta (sobre 10^{-8} segundos). Al final de su período, se combina con un electrón libre. Toda la masa de estas dos partículas se convierte entonces en dos fotones gamma de 0,51 MeV de energía cada uno. Figura 18.

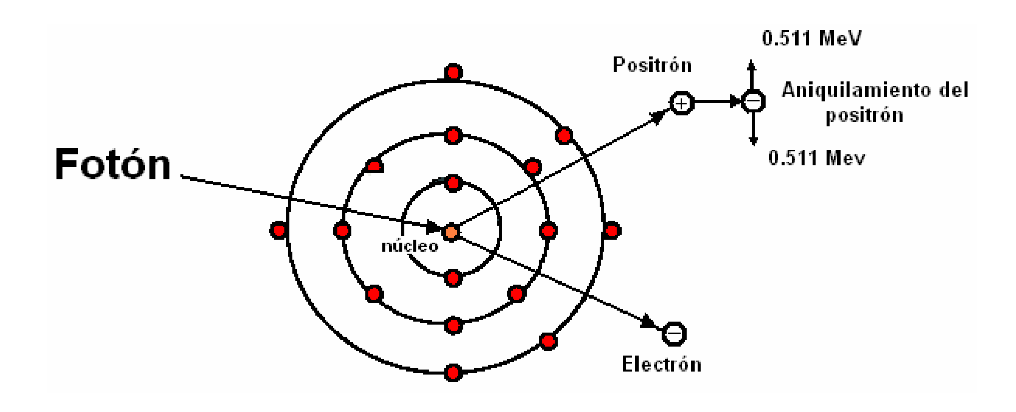


Figura 18- Representación esquemática de la producción de pares

El electrón y el positrón no proceden ni de las capas electrónicas (donde no hay positrones), ni del núcleo atómico (donde no existe ninguna de estas dos partículas); sino que son producidos a expensas de la energía del fotón. Por tanto, resulta evidente que para que este proceso pueda ocurrir, la energía del fotón tiene que ser mayor que el doble de la energía correspondiente a la masa en reposo del electrón, es decir $\mathbf{h\nu \geq m_0\, c^2}$ según el principio de conservación de la energía, tiene que cumplirse la expresión [147]:

$$h\nu - 2\, m_0\, c^2 = T_e + T_p$$

Donde:

$h\nu$- es la energía del fotón

m_0c^2- masa del electrón en reposo

T_e- Energía del electrón

T_p- Energía del positrón

Con una energía cinética cero, el positrón tiene una enorme probabilidad de ser aniquilado por un electrón, entonces, dado que el impulso o momento total de estas dos partículas en el punto exacto donde tiene lugar el proceso de aniquilamiento es nulo, los dos fotones son emitidos con sentidos opuestos. El proceso de aniquilamiento puede acontecer también antes de que el positrón pierda toda su energía cinética, en cuyo caso los fotones no son emitidos en sentidos opuestos, aunque esto resulta poco probable.

I.I.10-Radiación Roentgen (Rayos X)

Hace algo más de un siglo, en 1895, **Wilhelm Konrad Roentgen,* científico alemán de la Universidad de Würzburg, descubrió una radiación (entonces desconocida y de ahí su nombre de *rayos X*) que tenía la propiedad de penetrar los cuerpos opacos.

El 22 de diciembre de 1895, al no poder manejar al mismo tiempo su carrete, la placa fotográfica de cristal y colocar su mano sobre ella, le pide a su esposa que coloque la mano sobre la placa durante quince minutos. Al revelar la placa de cristal apareció la mano de Berta, la primera imagen radiográfica del cuerpo humano. Figura 19. Así nace una de las ramas más poderosas y excitantes de la Medicina: *la Radiología.* [148]

**Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923), físico alemán y primer Premio Nóbel de Física. En noviembre de 1895 leyó ante la Sociedad Físico-Médica de Würzburg un informe sobre su descubrimiento de radiaciones de onda corta a las que denominó rayos X. También realizó descubrimientos en mecánica, calor y electricidad.*

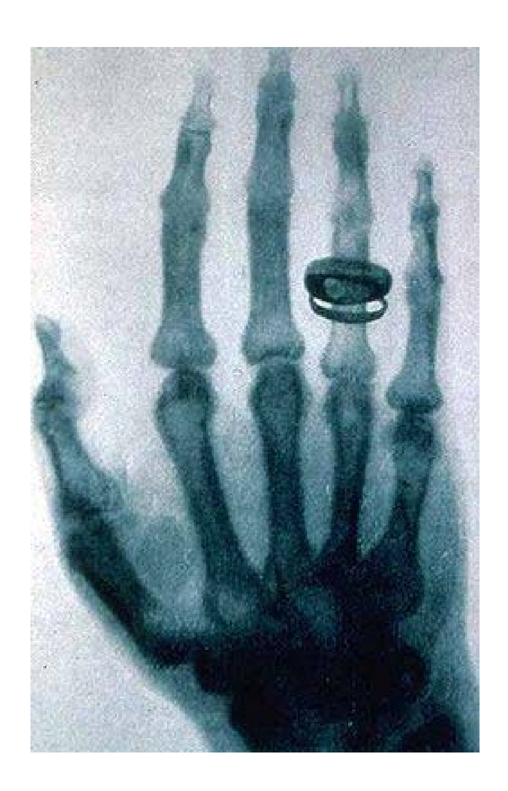


Figura 19- Radiografía de la mano de la esposa de Roentgen mostrando el anillo de bodas

Los rayos X son una radiación electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, las ondas de microondas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioleta y los rayos gamma.

La diferencia fundamental con los rayos gamma es su origen: los rayos gamma son radiaciones de origen nuclear que se producen por la desexcitación de un *nucleón* de un nivel excitado a otro de menor energía y en la desintegración de isótopos radiactivos, mientras que los **rayos X** surgen de fenómenos extranucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por desaceleración de electrones. La energía de los rayos X en general se encuentra entre la radiación ultravioleta y los rayos gamma producidos naturalmente. Figura 20

**Es toda aquella partícula constituyente del núcleo atómico: neutrones y protones*

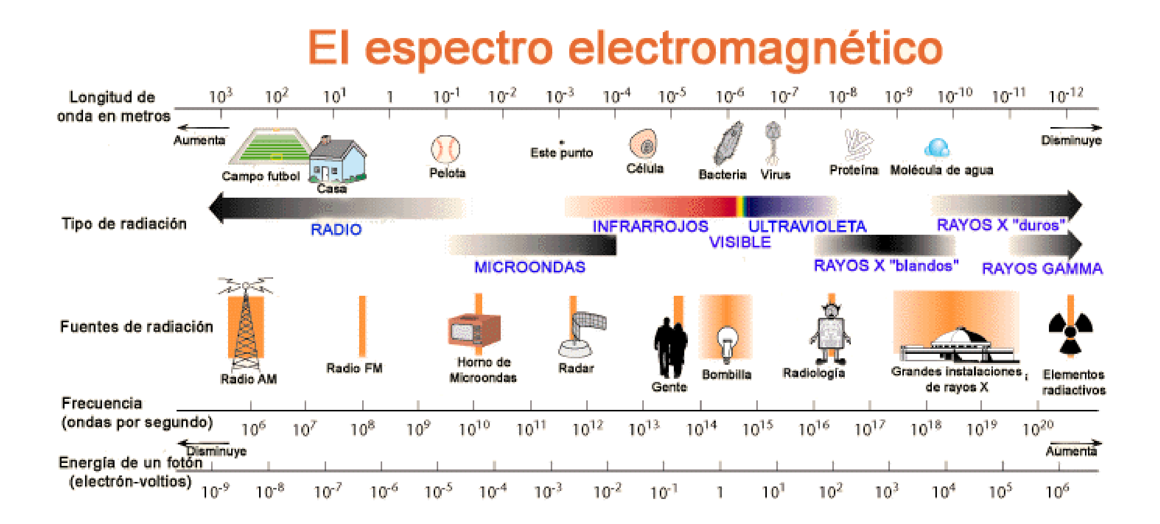


Figura 20- Espectro electromagnético general

Los rayos X son una radiación ionizante porque al interaccionar con la materia produce la ionización de los átomos de la misma, es decir, origina partículas con carga (iones)

I.I.10.a-Producción de rayos X

Los rayos X son producto de la desaceleración rápida de electrones muy energéticos (del orden 1000eV) al chocar con un blanco metálico. Según la mecánica clásica, una carga acelerada emite radiación electromagnética, de este modo, el choque produce un espectro continuo de rayos X (a partir de cierta longitud de onda mínima). Sin embargo experimentalmente, además de este espectro continuo, se encuentran líneas características para cada material. [149] El primer tubo de rayos X fue el tubo de Crookes, llamado así en honor a su inventor, el químico y físico británico **William Crookes*; se trata de una ampolla de vidrio bajo vacío parcial con dos electrodos.

**William Crookes (1832-1919), químico y físico británico. Su trabajo más importante, fue la investigación sobre la conducción de la electricidad en los gases. Inventó el tubo de Crookes para el estudio de las propiedades de los rayos catódicos*

Cuando una corriente eléctrica pasa por un tubo de Crookes, el gas residual que contiene se ioniza y, los iones positivos golpean el cátodo y expulsan electrones del mismo. Estos electrones, que forman un haz de rayos catódicos, bombardean las paredes de vidrio del tubo y producen rayos X. Estos tubos sólo generan rayos X blandos, de baja energía.

La producción de rayos X se da en un tubo de rayos X que puede variar dependiendo de la fuente de electrones y puede ser de dos clases: tubos con filamento o tubos con gas.

El tubo con filamento es un tubo de vidrio al vacío en el cual se encuentran dos electrodos en sus extremos. El cátodo es un filamento caliente de tungsteno y el ánodo es un bloque de cobre en el cual esta inmerso el blanco. El ánodo es refrigerado continuamente mediante la circulación de agua, pues la energía de los electrones al ser golpeados contra el blanco, es transformada en energía térmica en un gran porcentaje. Los electrones generados en el cátodo son enfocados hacia un punto en el blanco (que por lo general posee una inclinación de 45°) y producto de la colisión los rayos X son generados. Finalmente el tubo de rayos X posee una ventana la cual es transparente a este tipo de radiación elaborada en berilio, aluminio o mica. El tubo con gas se encuentra a una presión de aproximadamente 0.01 mmHg y es controlada mediante una válvula; posee un cátodo de aluminio cóncavo, el cual permite enfocar los electrones y un ánodo. Las partículas ionizadas de nitrógeno y oxígeno, presentes en el tubo, son atraídas hacia el cátodo y ánodo.

Los iones positivos son atraídos hacia el cátodo e inyectan electrones a este. Posteriormente los electrones son acelerados hacia el ánodo (que contiene al blanco) a altas energías para luego producir rayos X. El mecanismo de refrigeración y la ventana son los mismos que se encuentran en el tubo con filamento [150].

.

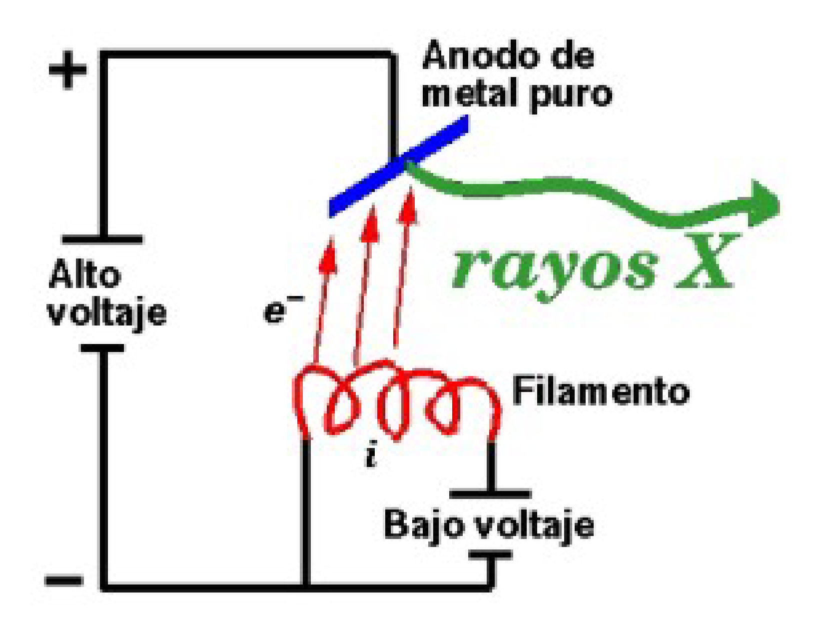


Figura 21- Esquema de un tubo convencional de rayos X

Los electrones se aceleran mediante una diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo. La radiación es producida justo en la zona de impacto de los electrones y se emite en todas direcciones. La energía adquirida por los electrones va a estar determinada por el voltaje aplicado entre los dos electrodos. Los Rayos X se originan cuando electrones de alta energía cinética son frenados repentinamente al chocar con el blanco. Los diferentes electrones no chocan con el blanco de igual manera, así que este puede ceder su energía en una o en varias colisiones, produciendo un *espectro continuo.*

Cuando los electrones que son acelerados en el tubo de rayos X poseen cierta energía crítica, pueden pasar cerca de una subcapa interna de los átomos que componen el blanco. Debido a la energía que recibe el electrón, este puede escapar del átomo, dejándolo en un estado altamente excitado. Eventualmente, el átomo regresará a su estado de equilibrio emitiendo un conjunto de fotones de alta frecuencia, que corresponden al espectro de líneas de rayos X. Este espectro va a depender de la composición del material en el cual incide el haz de rayos X, para el molibdeno, la gráfica del espectro continuo muestra dos picos

correspondientes a la serie K del espectro de líneas, estas están superpuestas con el espectro continuo., produciendo un *espectro característico.*

I.I.11- Magnitudes, unidades y constantes físicas

La ICRU (Internacional Comisión on Radiation Units and Measurements) elaboró un conjunto claro e inequívoco de definiciones para las magnitudes y unidades que deben usarse en medidas de dosis de radiación, como referencia útil.

Resulta esencial establecer una distinción entre magnitud y unidad. Una magnitud física caracteriza un fenómeno físico de forma tal que le lleva a una especificación numérica, mientras que la unidad es una muestra seleccionada de referencia de una cantidad y, es la escala numérica de la especificación.

En este documento, la magnitud más importante es la dosis absorbida por unidad de masa en un material irradiado. Sdefinición formal es el cociente:

$$D = \overline{dE} / dm$$

Donde $\overline{dE}$ es la energía medida cedida por la rradiación ionizante a un material de masa dm; esta última se puede tomar como muy pequeña, pero no tanto que la energía medida cedida $\overline{dE}$ esté sometida a fluctuaciones estadísticas. La dosis absorvida es, por consiguiente, una función puntual, contínua y diferenciable y, uno puede referirse a su gradiente y a su tasa. Asimismo, es posible especificar la dosis absorbida en cualquier medio para cualquier tipo de radiación.

La unidad en la cual se especifica la dosis adsorbida es $J.Kg^{-1}$ y su nombre es el Gray (Gy)[151]

$$1\ Gy = 1\ J.kg^{-1}$$

La tasa dedosis adsorvida se define como

$$D = dD/dt$$

La unidad de tasa de dosis absorbida es $J.kg^{-1}.s^{-1}$

$$1\ Gy.s^{-1} = 1\ J.kg^{-1}.\ s^{-1}$$

Cuando se consideran partículas indirectamente ionizantes como los fotones, también resulta conveniente cuantificar la energía liberada por ellas en su interacción con la materia. Esta magnitud Kerma (energía cinética liberada en la materia, a veces por unidad de masa) se define por el cociente:

$$K = dEtr./dm$$

Donde dEtr es la suma de las energías cinéticas de todas las partículas cargadas, liberadas por la interacción de las partículas ionizantes sin carga en una masa dm.

La unidad de la magnitud Karma es $J.kg^{-1}$ con el nombre especial de Gray (Gy). La magnitud Kerma (que se puede aplicar a cualquier material) está estrechamente relacionada con la magnitud exposición, que se aplica sólo a fotones que interaccionan con aire; su cociente es:

$$X = dQ/dm$$

Donde dQ es el valor absoluto de la carga total de iones de un signo producidos en el aire, cualdo todos los electrones liberados por fotones en una masa dm de aire, han sido

frenados por completo en el aire. La unidad es $C.kg^{-1}$. Sin embargo, la unidad especial Roentgen (R) aún se usa ampliamente.

$$1R = 2.58 X 10^{-4} C.kg^{-1}$$

Tal como se ha definido, la exposición es el equivalente de la ionización de Kerma en aire, excepto que la ionización producida por la absorción de la radiación de frenado emitida por los electrones no se incluya en dQ.

$$X = K_{aire} (1-g)/(W/e)$$

Donde K_{aire} es el Kerma en aire, g contituye la fracción de energía liberada que se disipa como radiación de frenado y el cociente W/e representa la energía media por unidad de carga, necesaria para producir un par de iones en el aire.

A menudo la energía media gastada en el aire por par de iones formados y por la carga eléctrica (W/e) se considera constante para radiación de electrones y para electrones producidos por fotones o por fuentes radiactivas.

$$W/e = 33.97 \pm 0.06 J.C^{-1}$$

II-Tecnologías relacionadas con las aplicaciones de las radiaciones en la medicina.

La medicina es el área que más se ha beneficiado con las propiedades de la radiación. En este capítulo se explican algunas de las múltiples técnicas de diagnóstico y de tratamiento de enfermedades en que se usa radiación. Se describen las bases físicas de las radiografías, la medicina nuclear y la radioterapia, así como sus principales ventajas

clínicas. Debido a que la cantidad de radiación necesaria para la mayoría de los exámenes de diagnóstico o los tratamientos de radioterapia es mucho mayor que la de los niveles naturales, es en los usos médicos donde mejor se aprecia la necesaria evaluación que se establece entre los riesgos y los beneficios inherentes a cualquier uso de la radiación, o sea, que se respete el precepto de *impartir la dosis necesaria, dañando lo menos posible el tejido sano.* Esto no deja de ser una extensión del principio ético Hipocrático derivados de la aplicación de una tecnología y donde los beneficios deben ser superiores a sus riesgos.

La aplicación de cualquier tecnología médica conlleva cierto riesgo para el paciente, pero si los beneficios esperados son mayores que los probables riesgos entonces no existe conflicto ético en el principio de la beneficencia. Por supuesto que esta beneficencia a su vez esta vinculada al conocimiento y al buen desempeño de la praxis de las ciencias de la salud. [152]

Antes del 8 de Noviembre de 1895, día en que Roentgen da a conocer al mundo su descubrimiento, el diagnóstico médico se realizaba por el interrogatorio al paciente, por la palpación y por la auscultación. Fue tal la magnitud del descubrimiento que a los pocos meses del anuncio ya se realizaban en el mundo exámenes radiográficos con fines médicos. A pesar de las posibles aplicaciones industriales de los rayos X, Roentgen se negó a comercializar o a patentar su descubrimiento. Roentgen pensaba que su descubrimiento pertenecía a la humanidad y que por ninguna razón éste iba a ser motivo de patentes, licencias o contratos. Esto dio lugar a que los primeros tubos de rayos X para usos médicos pudieran ser construidos rápidamente y a un precio muy accesible.

En las siguientes décadas fue impresionante el impulso con que se desarrolló esta actividad. Ya no solo era cuestión de poder ver los huesos en patología traumática u

osteoarticular, sino el poder ver, con la evolución de las sustancias de contraste, otras estructuras internas como el tubo digestivo, el sistema urinario, los vasos sanguíneos, etc.

Conforme se mejoraban los equipos de Rayos X haciéndolos más eficientes y seguros se iniciaban otras modalidades de imágenes. Así, luego del desastre del Titanic, por ejemplo, se desarrollaron grandes esfuerzos por obtener un método que detectara los obstáculos debajo del mar.El uso del ultrasonido de alta frecuencia en problemas marítimos se inició en la primera guerra mundial y las investigaciones entre 1948 y 1958, para la aplicación de esta técnica al diagnóstico, fue un trabajo en conjunto de personal y equipo militar, industrial y médico; sin embargo, no fue hasta finales de los 70 que se lograron los equipos a tiempo real tal como los conocemos actualmente.En 1972, el británico **Hounsfield* presenta en Londres el primer tomógrafo computarizado, en el cual la imagen no es analógica como en la radiología convencional, sino digital. En 1967 Hounsfield, que no conocía las investigaciones de ***Cormack*, también pensó en la combinación de varios haces de rayos X para obtener una imagen más detallada y en tres dimensiones de los órganos internos del cuerpo humano. [153]Cuando la tecnología informática avanzó lo suficiente como para introducir estas ideas, la compañía electrónica EMI creó un prototipo de escáner o tomógrafo de rayos X.

**Godfrey Newbold Hounsfield (1919-2004), ingeniero electrónico británico que colaboró en el desarrollo de una de las más importantes invenciones médicas del siglo XX: la tomografía axial computerizada (TAC).*

***Allan MacLeod Cormack (1924-1998), físico estadounidense de origen sudafricano, galardonado con el Premio Nóbel de Fisiología y Medicina en 1979, que compartió con el ingeniero electrónico británico sir Godfrey Newbold Hounsfield, por sus contribuciones teóricas y matemáticas al desarrollo de la tomografía axial computerizada (TAC)*

En 1972 EMI presentó una versión comercial, que fue acogida como un importantísimo avance por la comunidad médica. La historia de Cormack y Hounsfield es un ejemplo clásico de los muchos descubrimientos independientes que se llevan a cabo en el campo de las ciencias. El tomógrafo mide la atenuación de los rayos X conforme pasan a través de una sección del cuerpo desde diferentes ángulos, y luego, con los datos de estas medidas, los programas computarizados son capaces de reconstruir la imagen del corte anatómico.

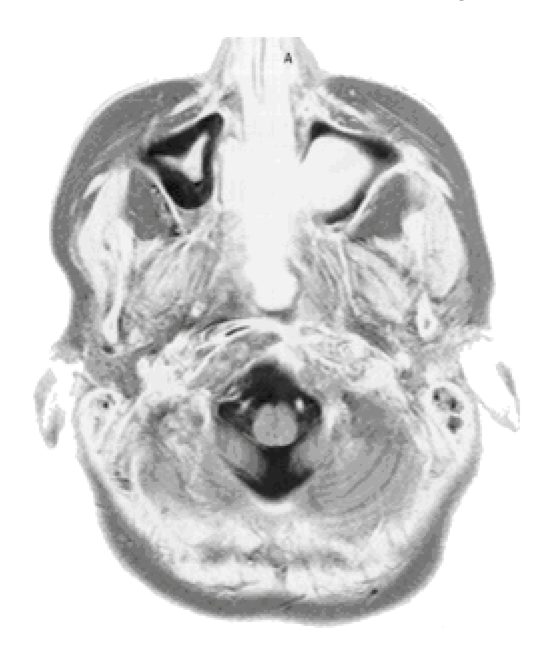


Figura 22- Tomografía Axial Computarizada

La más reciente aportación de la tecnología al diagnóstico por la imagen es la resonancia magnética. Su descubrimiento les valió el premio Nóbel de Física en 1952 a **Bloch* y ***Purcell.*

**Felix Bloch (1905-1983), físico estadounidense nacido en Suiza, que compartió el Premio Nóbel de Física en 1952 por desarrollar un nuevo método para medir con precisión la intensidad del campo magnético de los núcleos atómicos.*

***Edward Mills Purcell (1912-1997), físico estadounidense, que compartió el Premio Nóbel de Física en 1952, por sus contribuciones al desarrollo de un nuevo método para medir la fuerza del campo magnético en el núcleo de un átomo. Esta técnica se denomina resonancia magnética nuclear (RMN)*

Pero no fue hasta 1981 que se publicaron los estudios de los primeros pacientes sometidos a la técnica de R.M. con la espectroscopia, lo que permitiría una localización precisa de la fuente de la actividad metabólica en vivo. La gran diferencia de la resonancia magnética con todas las otras técnicas radica en que en lugar de radiaciones utiliza un pulso de radiofrecuencia y, una vez finalizado el pulso, se capta una señal proveniente del paciente, la cual es procesada por un equipo computarizado para reconstruir una imagen.

El notable evento merecedor en 1901 del primer premio Nóbel de Física por el descubrimiento de los rayos X resultó en un cambio trascendental en el manejo de nuestros pacientes al aportar la piedra angular de una nueva especialidad médica de desarrollo vertiginoso: *la radiología*, que permitía estudiar al paciente por dentro de forma no invasiva, haciendo cada vez más preciso el diagnóstico de las enfermedades.La radiología es la especialidad médica que se ocupa de generar imágenes del interior del cuerpo mediante diferentes agentes físicos (rayos X, ultrasonidos, campos magnéticos, etc.) y de utilizar estas imágenes para el diagnóstico y pronóstico de tratamientos de las enfermedades. También se le denomina genéricamente *radiodiagnóstico* o *diagnóstico por imagen.*

La radiología debe distinguirse de la radioterapia, que no utiliza imágenes, sino que emplea directamente la radiación ionizante (Rayos X de mayor energía que los usados para diagnóstico y también radiaciones de otro tipo), para el tratamiento de las enfermedades (por ejemplo, para detener o frenar el crecimiento de aquellos tumores que son sensibles a la radiación).

En este capítulo explicaremos los principios físicos de los métodos diagnostico más usados en radiología, radioterapia y la medicina nuclear.

II.1-Radiografías

Comenzaremos refiriéndonos al uso más general de la radiación en medicina, *las radiografías*, es decir el uso de los rayos X para exámenes de diagnóstico. La base fundamental para la aplicación de los rayos X en muchas áreas de la ciencia, es su propiedad de atenuación exponencial. Los rayos X al atravesar un material pueden ser absorbidos o dispersados en su trayectoria, lo cual resulta en una disminución en la intensidad original. Los procesos de absorción o dispersión se deben a interacciones entre los átomos del medio y los rayos X.

Entre los usos médicos de la radiación, el examen de pacientes con rayos X con el propósito de dar un diagnóstico es, por mucho, el más frecuente. El objetivo del diagnóstico radiológico es proporcionar información anatómica al médico sobre el interior del paciente. Los rayos X constituyen una herramienta ideal para sondear, de manera “no invasiva", el interior del cuerpo humano. Sin embargo, durante la formación de la imagen existen procesos de deposición de energía en el paciente. Estos procesos llevan asociado un cierto daño biológico que en algunos casos puede afectar a la salud del paciente. En países desarrollados, aproximadamente el 90% de la dosis a la población debida a radiación causada por el hombre, se debe al uso de los rayos X para el diagnóstico radiológico. Aunque las dosis asociadas a este tipo de exámenes son relativamente pequeñas, la frecuencia con que éstos se llevan a cabo ocasiona que el impacto social sea considerable. Dado que el propósito de un examen médico es proporcionar un beneficio directo al paciente, los procedimientos de radiodiagnóstico han sido optimizados de tal manera que las dosis sean lo más bajas posibles y al mismo tiempo contengan la información necesaria para dar un diagnóstico adecuado.

Una radiografía convencional es una imagen bidimensional de un objeto tridimensional. Esto significa que toda la información en profundidad se pierde, pues los diferentes niveles de

gris en la imagen dan información sobre la atenuación de los rayos X a lo largo de una trayectoria en el espacio tridimensional (Figura 23).



Figura 23- Formación de una imagen plana con rayos x.

La intensidad de cada tono de gris proporciona información acerca de la densidad de los tejidos atravesados. El cuerpo humano puede describirse como una función continua de coeficientes de atenuación lineal.

Otro de los empleos más extendidos de las radiografías son las *mamografías.* La mamografía consiste en una exploración diagnóstica de imagen por rayos X de la glándula mamaria, mediante equipos con una configuración especialmente adaptados para las mamas, denominados mamógrafos y, están concebidos para conseguir la mayor resolución posible en la visualización de las estructuras fibroepiteliales internas de la glándula mamaria. Figura 24.



Figura 24- Mamografía con lesión sospechosa

Su capacidad de identificación de lesiones de mínima dimensión ha preconizado su utilización en revisiones sistemáticas para detectar tumores antes de que puedan ser palpables y clínicamente manifiestos [154].

Los rayos X afectan a una emulsión fotográfica del mismo modo que lo hace la luz. La absorción de rayos X por una sustancia depende de su densidad y masa atómica. Cuanto menor sea la masa atómica del material, más transparente será a los rayos X de una longitud de onda determinada.

Cuando se irradia el cuerpo humano con rayos X, los huesos (compuestos de elementos con mayor masa atómica que los tejidos circundantes) absorben la radiación con más eficacia, por lo que producen sombras más oscuras sobre una placa fotográfica. En la actualidad se utiliza radiación de neutrones para algunos tipos de radiografía y, los resultados son casi los inversos. Los objetos que producen sombras oscuras en una imagen de rayos X aparecen casi siempre claros en una radiografía de neutrones [155].

En radiografía convencional el detector más utilizado consiste en la combinación de una pantalla fluorescente acoplada a una película fotográfica. Las características más importantes de este sistema son la eficiencia de detección de rayos X (que depende esencialmente de la composición y grueso de la pantalla fluorescente), la eficiencia de conversión a luz visible y el acoplamiento óptico entre la pantalla y la película. El intervalo de energía utilizado para este tipo de estudios varía aproximadamente entre los 15 y los 150 keV. Las características específicas del sistema dependen del tipo de estudio que se desea realizar, por ejemplo, si se trata de un estudio del tórax o del abdomen. La mayoría de las pantallas fluorescentes modernas se basan en compuestos de tierras raras tales como el oxisulfuro de gadolinio (Ga2 O2 S).

Para energías de interés clínico la eficiencia de detección de este tipo de pantallas puede llegar a ser hasta del 80%. Un segundo grupo de detectores lo constituyen los llamados “intensificadores de imagen", los cuales se utilizan en técnicas de fluoroscopia.

Este tipo de estudios son dinámicos, de tal manera que la salida del intensificador se envía a un sistema de TV para observar la imagen radiográfica en tiempo real. El intensificador consiste de una pantalla fluorescente acoplada a un fotocátodo y de un sistema de óptica de electrones que enfoca la imagen en una segunda pantalla fluorescente. Este tipo de detectores produce una ganancia en luminosidad de hasta 5000 veces, aunque lleva asociada una cierta pérdida en resolución espacial.

II.2- Tomografía Axial Computarizada

La tomografía axial computarizada (TAC) es tal vez la técnica más sofisticada en la aplicación de los *rayos X* en medicina.

Tomografía viene del griego *tomos* que significa corte o sección y de *grafía* que significa representación gráfica. Por tanto tomografía es la obtención de imágenes de cortes o secciones de algún objeto. La palabra *axial* significa "relativo al eje". Plano axial es aquel que es perpendicular al eje longitudinal de un cuerpo.

La tomografía axial computarizada o TAC, aplicada al estudio del cuerpo humano, obtiene cortes transversales a lo largo de una región concreta. *Computarizada* significa someter datos al tratamiento de una computadora [156].

A escala macroscópica, el resultado de las interacciones de los rayos X con la materia es que el haz de fotones va cediendo energía a medida que se propaga a través del medio material y se va produciendo una reducción progresiva de los mismos, produciéndose una atenuación del haz de radiación.

Bajo determinadas condiciones se puede comprobar experimentalmente, que el número de fotones existentes después de que un haz de estos incide sobre un material de un espesor determinado, disminuye, a este fenómeno se conoce como *coeficiente lineal de atenuación.*

La técnica de TAC produce un mapa bidimensional de los coeficientes de atenuación lineal de los haces de rayos X de un cuerpo tridimensional, a partir de un número muy grande de medidas de transmisión. La forma más sencilla de tomografía computarizada consiste en el uso de un haz de rayos X finamente colimado y un detector. La fuente de rayos X y el detector están conectados de tal modo que se mueven de forma sincronizada. Cuando el conjunto fuente-detector efectúa un barrido, o traslación, del paciente, las estructuras internas del cuerpo atenúan el haz de rayos X según sus respectivos valores de número atómico y densidad de masa.

La intensidad de radiación detectada variará, así, conformará un perfil de intensidad llamado proyección. Al concluir la traslación, el conjunto fuente-detector regresa a su posición de partida y, el conjunto completo gira para iniciar una segunda traslación. Durante ésta, la señal del detector vuelve a ser proporcional a la atenuación del haz de rayos X de las estructuras anatómicas, de lo que se obtiene un segundo resultado de exploración. Si se repite este proceso un número elevado de veces, se generarán numerosas proyecciones. Estas proyecciones no se perciben visualmente, sino que se almacenan en una computadora. Después, esta las procesa y estudia sus patrones de superposición para reconstruir una imagen final de las estructuras anatómicas

En términos prácticos, este mapa bidimensional corresponde a una imagen transversal del paciente. Si un conjunto de mapas bidimensionales son ensamblados, uno detrás del otro, puede obtenerse una imagen que ahora es tridimensional y que punto a punto da información sobre los coeficientes de atenuación lineal del paciente, es decir, da información sobre su anatomía [157].

Para comprender qué hace la computadora con los datos que recibe exponemos los siguientes diagramas.

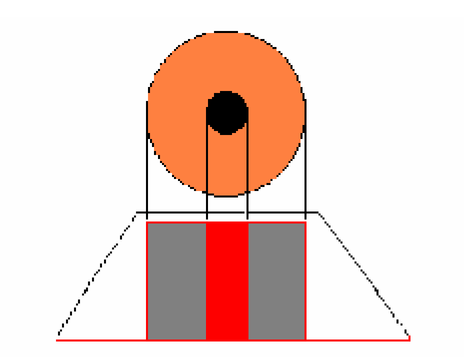


Figura 25- Esta figura representa el resultado en imagen de una sola incidencia o proyección (vertical, a 90º). Se trata de una representación esquemática de un miembro, por ejemplo un muslo. El color rojo representa una densidad elevada, la del hueso. El color gris representa una densidad media, los tejidos blandos (músculos). El hueso, aquí, deja una zona de "sombra". Los músculos, una zona de "penumbra".

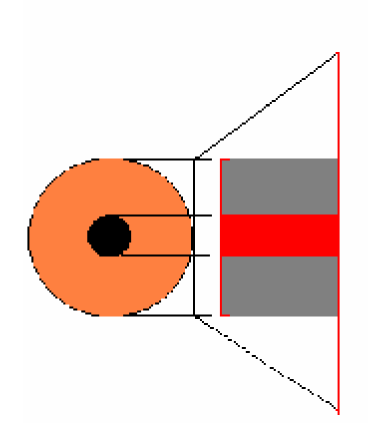


Figura 26- Esta figura también representa el resultado en imagen de una sola incidencia o proyección, pero con un ángulo diferente (horizontal, a 180º).

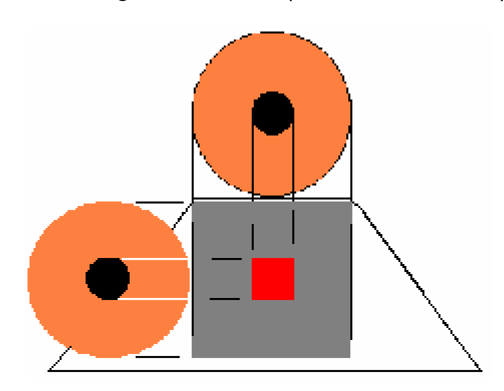


Figura 27- En esta figura se muestra qué hace la computadora con las dos imágenes. La zona de sombra ya está limitada al centro de la figura, pero la imagen presenta unos perfiles muy diferentes al objeto que se estudia (un cuadrado en vez de un círculo).

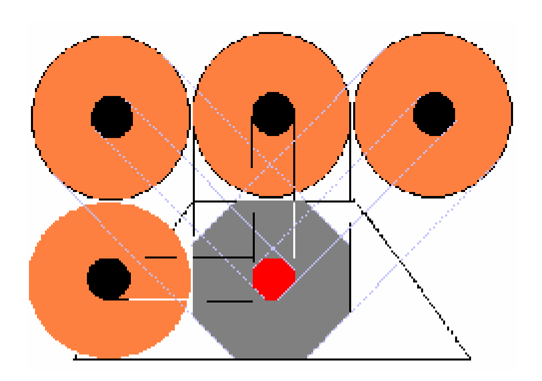


Figura 28- En esta imagen la computadora dispone de datos de cuatro incidencias: 45º, 90º, 135º y 180º. Los perfiles de la imagen son octogonales, lo que la aproximan mucho más a los contornos circulares del objeto real.

Una vez que ha sido reconstruido el primer corte, la mesa donde el objeto reposa avanza (o retrocede) una unidad de medida (hasta menos de un milímetro) y el ciclo vuelve a empezar. Así se obtiene un segundo corte (es decir, una segunda imagen topográfica) que corresponde a un plano situado a una unidad de medida del corte anterior [158]. Figura 29

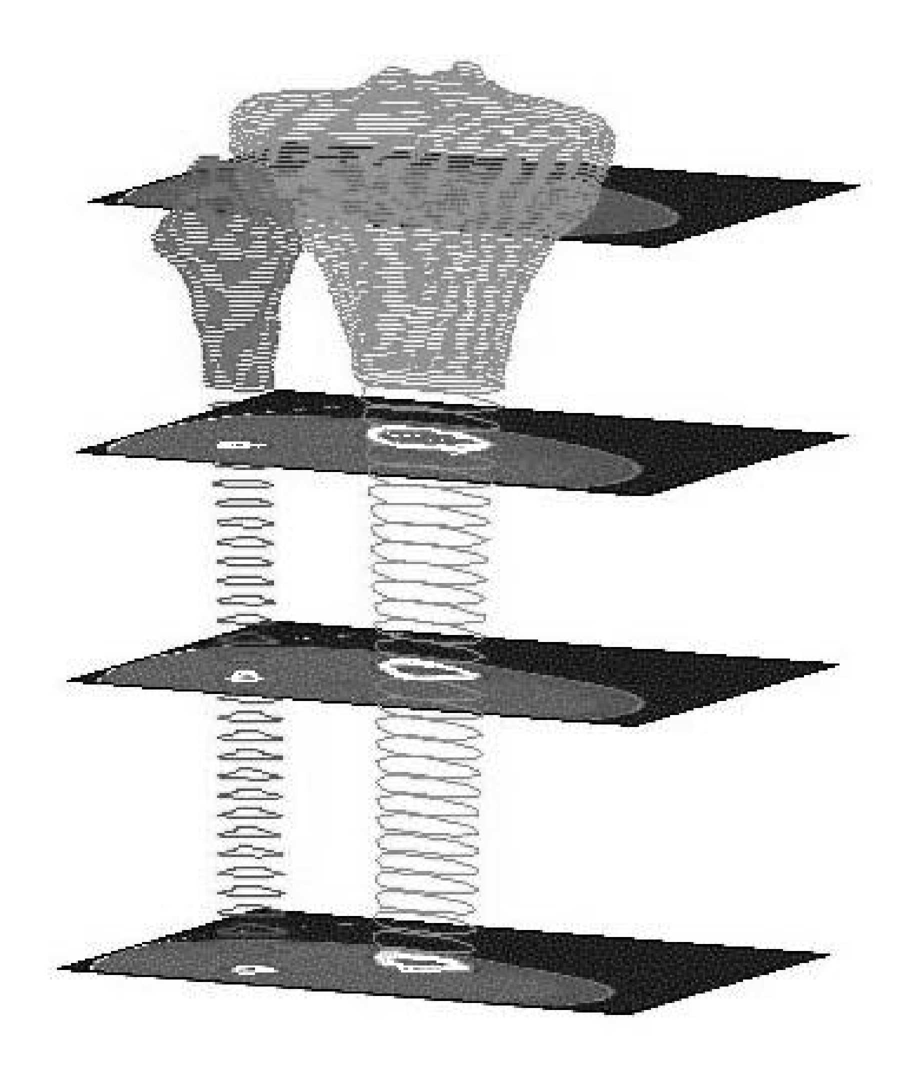


Figura 29- Representación gráfica del proceso de obtención de los cortes tomográficos del muslo.

La imagen capturada por el tomógrafo no es más que una matriz conformada por cuadros dispuestos en filas y columnas, donde cada cuadro es un píxel, y de acuerdo al grado de atenuación, a este píxel se le asocia un color sea negro, blanco o alguno de la escala de grises (figura 30).

Cada cuadro o píxel tiene una profundidad determinada por el grosor con que se esté realizando la tomografía en el paciente en cada corte y a este grado de profundidad se le denomina vóxel.

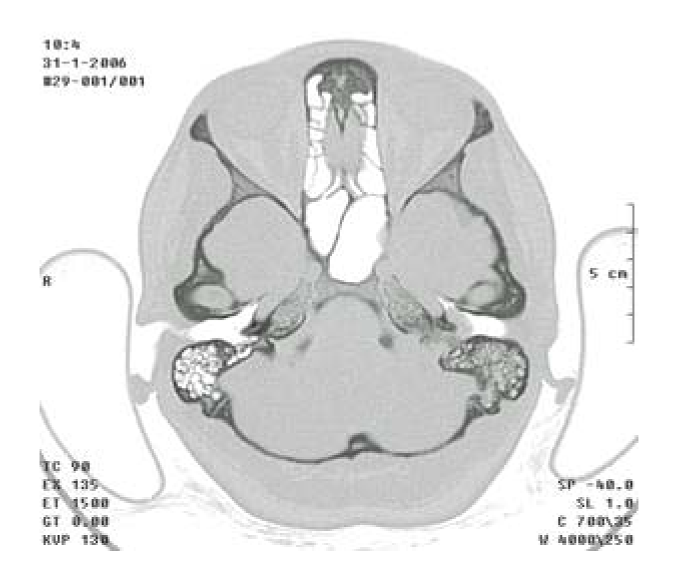


Figura 30- Corte tomográfico de cabeza

Es decir el coeficiente de atenuación representado en un píxel es la media de todos los coeficientes de atenuación que existan en el volumen del vóxel.

Cuando la computadora reconstruye las imágenes, los valores del vóxel de la imagen se normalizan al coeficiente de atenuación lineal del agua. Estos valores se expresan en Unidades *Hounsfield* y se denotan por medio de la siguiente formula

$$\mathbf{HU=} \; \mathbf{(}\mu\text{objeto} \; \mathbf{-} \; \mu\text{agua}\mathbf{)} \; \mathbf{/} \; \mu\text{agua} \; \mathbf{X} \; 1000$$

Tenemos que tener en cuenta que la escala consta de un número superior a 4.000 unidades HU y, que lo tenemos que representar en escalas de grises de forma que el más denso tenga una unidad HU más alta y se aproxime al blanco, mientras que el menos denso (unidad HU baja) se aproxime al negro.

Sabemos que el ojo humano no es capaz de distinguir más de 40 escalones de grises aproximadamente, por tanto, nuestro ojo, si ve 100 unidades HU con la misma tonalidad de gris, creerá que todo lo que está en el rango entre 0 y 100 es de la misma materia, lo cual es grave; ya que para nuestra vista será lo mismo cartílago, hígado, intestino, etc. Existe una forma para que esto no ocurra y es representando en escalas de gris solamente la parte de la escala que nos interesa. Supongamos que vamos a mostrar en nuestro monitor la parte correspondiente al rango entre 0 y +80. El gris medio corresponderá al 40; por encima de 80 todo será blanco y por debajo de 0 todo será negro. De esta manera podemos ver diferencias entre cada dos unidades (ya que nuestro ojo diferencia cuarenta escalones de gris) [159].

A esta anchura o cantidad de valores HU, las cuales podremos seleccionar libremente en el escáner se le llama *ventana.* En esta escala al hueso cortical se le asigna un valor de +1000, al aire -1000 y al agua cero. A los otros tejidos se le asigna un número de acuerdo a su densidad relativa [160].

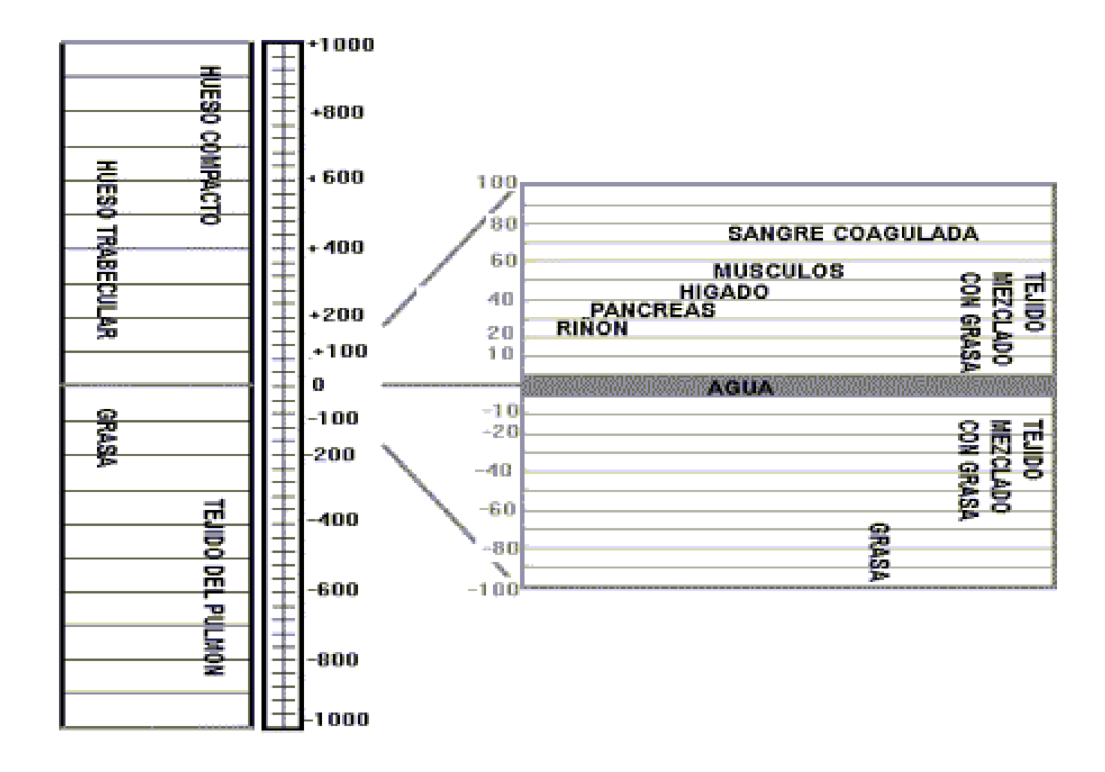


Figura 31- Escala de Hounsfield

Los dispositivos de TAC más modernos, pueden producir imágenes con diferencias en densidad de hasta el 0.5% y resoluciones espaciales de hasta 0.5 mm.

II.3- Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

La resonancia magnética nuclear es uno de los métodos diagnostico más recientes para la exploración de cortes seccionales del cuerpo. La formación de imagen por RMN, no requiere energía externa, pues la información proviene de las señales de alta frecuencia emitidas bajo ciertas condiciones de excitación, por los núcleos de hidrógeno u otros elementos contenidos en el cuerpo humano.

Para obtener estas imágenes se sitúa al paciente e un campo magnético intenso inducido por un electroimán de gran tamaño. Un generador de ondas cortas, transmite a través de una antena pulsos secuenciales de alta frecuencia, al interior del cuerpo. Después de cada pulso de excitación, un receptor de ondas cortas recibe una señal de la misma frecuencia,

durante un segundo aproximadamente. Este proceso ocurre debido a que la RMN permite alinear los campos magnéticos de diferentes núcleos en la dirección de un campo magnético externo. Como la respuesta a este campo externo depende del tipo de núcleos atómicos es por lo que esta técnica puede utilizarse para obtener información sobre una muestra. El principio físico parte del hecho de que todos los núcleos que contienen un número impar de protones (número atómico) o un número másico impar tienen un momento magnético intrínseco y un momento angular. Si un núcleo con estas características se somete a un campo magnético constante, percibirá un par de fuerzas que lo harán girar sobre sí mismo hasta que el momento magnético y el campo magnético se encuentren alineados [161].

Dos alineamientos serán posibles. Por una parte, el campo magnético y el momento magnético pueden apuntar en la misma dirección, configuración que tendrá una energía mínima y será la más probable. Por la otra, ambos vectores pueden apuntar en direcciones opuestas, caso en el que la energía será ligeramente superior. Debido a esta diferencia de energía, si un núcleo es perturbado por un campo electromagnético de la frecuencia apropiada, se producirá un fenómeno de resonancia; los núcleos del estado de energía inferior se excitarán al estado de energía superior [162].

Cuando el estímulo cese, los núcleos emitirán, en forma de fotones, la energía que habían absorbido. Fotones que podrán detectarse utilizando el equipamiento adecuado. A este proceso se le llama *relajación energética* Las frecuencias necesarias para producir el fenómeno de resonancia se encuentran dentro del rango de la **radiofrecuencia.*

**Radiofrecuencia. Cada una de las frecuencias de las ondas electromagnéticas empleadas en la radiocomunicación.*

Las frecuencias necesarias para producir el fenómeno de resonancia se encuentran dentro del rango de la radiofrecuencia. El núcleo más utilizado para observar el efecto son: el protio (^{1}H), por ser el más abundante y fácil de encontrar, y el carbono-13 (^{13}C). Otros isótopos que pueden utilizarse son: ^{15}N, ^{14}N, ^{19}F, ^{31}P, ^{17}O, ^{29}Si, ^{10}B, ^{11}B, ^{23}Na, ^{35}Cl y ^{195}Pt.

Los equipos médicos de resonancia magnética nuclear suelen trabajar a una frecuencia de 300 MHz para la resonancia de H1, y entre 20 MHz y 50 MHz para otros átomos.La calidad de las señales de resonancia emitidos por la materia dependen de varios parámetros fundamentales. Los tiempos de relajación (TI y T2), densidad de los núcleos resonantes y velocidad de flujo de materia estudiada, los tiempos de relajación (TI y T2), son fundamentalmente tiempos que miden la rapidez o lentitud de como se recuperan los núcleos resonantes al ser sometidos o perturbados por las ondas de radiofrecuencia adecuados.

Los tiempos de relajación de los protones (o de cualquier núcleo resonante) son completamente dependientes del resto de los átomos que los rodean, ya que estos modifican sus características de movimiento físico en relación con su entorno midiéndose mediante el T1 o *tiempo de relajación longitudinal* o el T2 o *tiempo de relajación transversal.*

La RMN no se basa en un solo parámetro como el coeficiente de atenuación de rayos X, sino en tres parámetros independientes TI, T2 y densidad spin o densidad protónica (DS o DP), además de varios parámetros secundarios. Los parámetros de RMN varían considerablemente de un tejido a otro. Mientras que el coeficiente de absorción de rayos X solo varia en 1% entre distintos tejidos, la densidad de spin y el tiempo de relajación T1 de los mismos tejidos difieren un 20-30%.. El tiempo de relajación T2 difiere en un 40% para los mismos tejidos. Esas diferencias intrínsecas en los parámetros de RMN son los responsables *de su excelente resolución de bajo contraste*, que constituye la principal ventaja de la técnica. Figura 32



Figura 32- Resonancia magnética nuclear de cabeza

Otras ventajas de la RMN es que las imágenes se obtienen mediante campos magnéticos de radiofrecuencia, con lo que se evitan incluso pequeños riesgos que acompañan a las dosis bajas de radiación administradas en TAC o en los exámenes convencionales de Rx. También se pueden obtener imágenes volumétricas sin modificar la posición del paciente, esa capacidad para obtener vistas en múltiples planos, que es otra de las ventajas claras de las RMN.

II.4- Medicina nuclear

No existe una fecha exacta para decidir cuando se aplicaron a pacientes (con fines médicos), los primeros materiales radiactivos. Al concluir la segunda guerra mundial, el uso de materiales radiactivos en medicina se denominaba *medicina atómica* [163]. La mayoría de los estudios en ese entonces se realizaban con isótopos radiactivos de C, H, I, Fe y Cr.

Hacia principios de la década de los años 60 la medicina atómica se convirtió en *medicina nuclear* [164]. La medicina nuclear, a diferencia de la radiología, comenzó como una rama médica y de investigación en radioquímica *in vivo* e *in vitro*, respectivamente. Con el tiempo, las técnicas radioquímicas *in vitro*, área hoy conocida como química clínica fueron separándose de la medicina nuclear, que cada vez más, concentró sus esfuerzos e investigaciones en análisis químicos y funcionales *in vivo*. Hoy, debido a los cientos de

moléculas radiomarcadas existentes utilizadas para diagnóstico y tratamiento *in vivo*, la medicina nuclear cambia nuevamente su nombre al de *medicina nuclear molecular* [165].

La *medicina nuclear molecular* puede definirse de manera sencilla como la rama de la medicina en la que se utilizan las propiedades de materiales radiactivos y estables para investigar procesos fisiológicos y bioquímicos normales y anormales, así como para diagnosticar y tratar procesos patológicos que afectan al organismo. La definición incluye evaluaciones funcionales más que anatómicas. Esta especialidad es, por lo tanto, una disciplina mixta e interdisciplinaria en la que la fisiología, la biología molecular, la bioquímica, la biofísica, el diseño de instrumentos o la radioterapia tienen tanta importancia como la medicina interna, la oncología, la endocrinología, la neurología, la cardiología, la hematología, la inmunología o la nefrología, entre muchas otras.

Pero la medicina nuclear molecular es también una disciplina autónoma, con identidad propia y con énfasis en la aplicación de las radiomoléculas en favor de la humanidad.

II.4.a-Radiotrazadores, radiofármacos y radiomoléculas

Los materiales usados en medicina nuclear no son medios de contraste. Los radiotrazadores, radiofármacos y radiomoléculas (en este epígrafe los denominaremos *radiofármacos*) ideales deben cumplir con ciertas características, entre las que se encuentran las siguientes:

- Deben ser fisiológicamente inocuos
- No deben ocasionar efectos tóxicos
- No deben producir efectos farmacológicos
- No deben desencadenar reacciones alérgicas, alteraciones hemodinámicas ni osmóticas.

Los radiofármacos, los radionúclidos primarios y los compuestos marcados, son sustancias en las que se une a sus características químicas estructurales propias la cualidad de emitir radiaciones. Los radionúclidos primarios son generalmente compuestos inorgánicos del elemento respectivo en solución, como, por ejemplo, yoduro de sodio radiactivo (^{131}I Na). Los compuestos marcados son el resultado de un proceso que incorpora o une un radionúclido primario y una molécula, elegidos conforme a la finalidad que persigue (por ejemplo, DTPA ^{99m}Tc (dietilentetraminapentacético). Los radionúclidos primarios pueden producirse en reactores nucleares o en aceleradores de partículas [166].

La producción de compuestos marcados se realiza mediante procesos diversos:

1. El intercambio isotópico, en el cuál un átomo estable de una molécula es reemplazado por un átomo radiactivo de la misma identidad (por ejemplo, el ortoyodohipurato de sodio ^{131}I).
2. Por incorporación del radionúclido en una sustancia que lo capta sin que éste se integre a su estructura original y sin que la altere en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (como la yodoalbumina ^{131}I , que se prepara a partir de la albúmina humana)
3. La fijación o coprecipitación del radionúclido con el compuesto (por ejemplo, hidróxido de estaño coprecipitado con el ^{99m}Tc).

Las aplicaciones de los radiofármacos referente a la investigación y al diagnóstico clínico, comprenden distintas modalidades:

1. Las investigaciones de procesos metabólicos, que incluyen la determinación de la composición del cuerpo y su estado funcional, como son el total de agua, el volumen del fluido extracelular, el sodio y potasio intercambiables, etc.

2. Técnicas centellográficas que permiten la visualización de órganos o sistemas diversos en sus aspectos morfológicos, estructurales y funcionales (los radiofármacos susceptibles de usarse con este fin son agentes productores de imágenes) Figura 33



Figura 33- Imagen de parte del sistema vascular del cerebro

3. Estudio dinámico de los fluidos: sangre, orina, liquido cefalorraquídeo, etc. Figura 34.

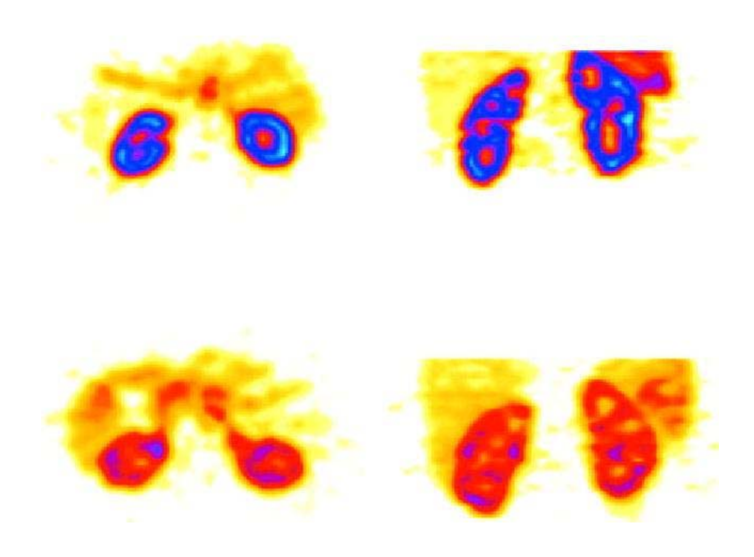


Figura 34- Imagen del flujo sanguíneo renal

4. Procedimientos que conjugan técnicas de inmunológicas y bioquímicas con los radiofármacos, posibilitando la evaluación de sustancias diversas: hormonas, vitaminas, virus, drogas existentes en la sangre u otros fluidos en concentraciones ínfimamente pequeñas (nanogramo, picogramo), primordialmente del radioinmunoensayo.

Las tres primeras aplicaciones se practican en parte o totalmente "in vivo" y la última totalmente "in vitro". Tienen por finalidad, la evaluación de la radiactividad, como en el caso de la curva de la captación renal (Figura 35) que es un parámetro funcional, o la creación de una imagen, como en el caso de la centellografía o gammagrafía. Figura 36

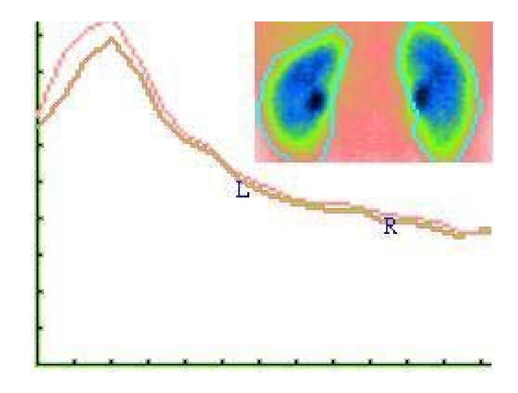


Figura 54- Renograma isotópico representando las imágenes radioisotópicas y las curvas de excreción de ambos riñones

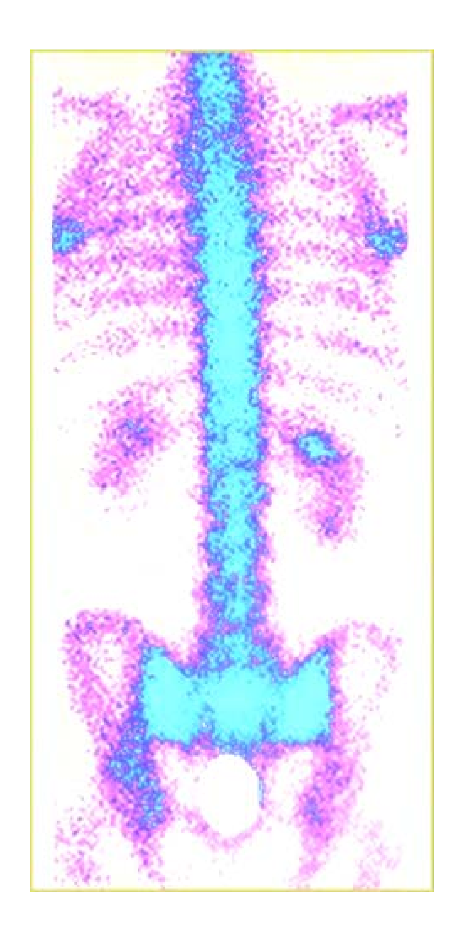


Figura 36- Gammagrafía ósea

La administración de los agentes radiactivos o radiofármacos, se realiza de dos formas: como radionúclido simple (ejemplos: yoduro de sodio (^{131}I Na), fluoruro de sodio (^{18}FNa), cloruro de hierro ($Cl_3{}^{59}Fe$) dotado de alto nivel de localización específica tisular para el órgano de interés; o bien, como compuestos, sea en forma de moléculas o en forma de partículas marcadas como compuestos, sea en forma de moléculas o en forma de partículas marcadas susceptibles de revelarnos su trayectoria hasta que alcanzan su destino. [167]

La cantidad de material radiactivo con el que se marcan los fármacos que serán administrados con fines diagnósticos o terapéuticos a pacientes adultos o pediátricos se calcula en milicuries si se emplea el sistema tradicional de unidades o en megabequereles cuando se prefiera el sistema internacional de unidades (ejemplos: 1 mCi = 37 MBq, 20 mCi = 740 MBq). La cantidad de fármaco casi nunca requiere un cálculo especial y se realiza de

forma convencional siguiendo simplemente el instructivo del proveedor para cada reactivo. De cualquier forma, la cantidad de reactivo (fármaco) es siempre pequeñísima y, de ahí la ausencia de reacciones o efectos indeseables (aún en pacientes recién nacidos).

II.4.b-Instrumentos y dosis de radiofármacos

La instrumentación es también importante. Los gammágrafos (previos a la aparición de las gammacámaras) estaban optimizados para detectar fotones (radiación electromagnética) de alta energía provenientes de isótopos como el Iodo 131 (360 keV).

El I-131 proporciona una dosis de radiación mayor a la necesaria en la actualidad, que contamos con materiales como el Tc-99m. Las gammacámaras de primera generación, construidas en las décadas de los 60 y 70 y optimizadas para detectar fotones de baja energía (140 keV), eran (y siguen siendo ya que en muchos lugares se siguen utilizando) menos sensibles que las gammacámaras actuales para detectar fotones, por lo cual también se deduce que en la actualidad se requiere todavía menos dosis de material radiactivo para obtener resultados semejantes o mejores que hace algunos años.

II.5- Radioterapia

La radioterapia es una forma de tratamiento basado en el empleo de radiaciones ionizantes (rayos X o radiactividad, la que incluye los rayos gamma y las partículas alfa). A menos de un año después del descubrimiento de los rayos X por Roentgen, el dermatólogo austriaco Leopod Freund los utilizó para tratar un tumor benigno. Algunos días después de la aplicación del tratamiento, la piel se volvió eritematosa (enrojecida como después de una insolación), los pelos cayeron y el lunar se necrosó. Por primera vez, un tumor era tratado con éxito sin intervención quirúrgica. En los años 60, la radioterapia progresó mucho con la puesta en práctica de los aceleradores lineales, potentes, de tamaño reducido y fácil

mantenimiento. Los ***e$^-$*** son acelerados por un campo electromagnético y chocan contra una "diana" que produce una radiación de frenado rico en fotones de alta energía (más de 20.000.000 de electrovoltios), capaz de penetrar profundamente en los tejidos. Puede aceptarse como premisa que el tratamiento radiante ideal procura irradiación uniforme de toda la lesión, equivalente a la que el tratante se propone y, nula en el resto del organismo. Lamentablemente, ésta es una meta aún no lograda, pero constituye una excelente referencia para evaluar comparativamente el grado de eficiencia de las distintas técnicas de irradiación, según la medida en que cada una de ellas logre acercarse a lo deseado. [168]

Las técnicas de irradiación en uso actualmente configuran dos tipos básicos: la terapia externa, en la cual la fuente de irradiación se halla fuera del paciente y, la terapia interna, en la cual la fuente de irradiación está dentro del paciente mismo y que comprende principalmente medios metabólicos y mecánicos. La radioterapia externa (***RE***) está representada por los tratamientos que utilizan: (a) equipos de radioterapia convencional; (b) bombas de cobalto y de cesio; (c) generadores no convencionales de rayos X y de electrones (betatrones, aceleradores lineales, etc.); y (d) aplicadores oftálmicos, dermatológicos, etc La radioterapia interna (***RI***) comprende los tratamientos que se efectúan con: (a) fuentes selladas intracavitarias o intersticiales de ^{226}Ra, ^{60}Co, ^{90}Y, ^{198}Au, ^{51}Cr, etcétera, en forma de tubos, agujas, semillas, perlas o alambres; (b) soluciones radiactivas metabolizables, como el radioyodo(^{131}I), el fósforo iónico(^{32}P) y los radiocoloides (^{32}P, ^{198}Au).

II.5.a-Terapia Externa

La ***RE*** en forma de teleterapia, excluyendo la que se realiza mediante aplicaciones dermatológicas u oftalmológicas, actúa en función de radiaciones gamma y de rayos X (terapia convencional). Se caracteriza por el hecho de que la fuente de radiación esté a

cierta distancia del paciente, penetrando en él según una dirección única ó varias preestablecidas no simultáneas. Generalmente, el haz de radiación externa encuentra en su trayecto tejidos sanos, antepuestos, laterales o pospuestos a la lesión, pero es técnicamente factible evitar la irradiación de los tejidos laterales adyacentes.

La irradiación del tejido sano eventualmente antepuesto a la lesión es inevitable y, en determinadas circunstancias, obliga a planificar por lo menos dos incidencias o más distintas. De este modo, incide sobre la lesión la dosis de radiación necesaria y se reduce al mínimo el daño inconveniente a los tejidos sanos antepuestos. La telerradioterapia rotatoria y la pendular persiguen la misma finalidad. No obstante, las técnicas de ***TE*** están lejos de realizar lo deseado porque la irradiación de tejidos sanos adyacentes es inevitable.[169]

Para minimizar estos daños colaterales y debido al incremento de la información básica relacionada con esta especialidad la Agencia Internacional de Energía Atómica convino en considerar el asesoramiento en el empleo de las distribuciones dosimétricas de los haces de radiación de alta energía usados en radioterapia. La configuración y optimización de los tratamientos radiantes tienen una relación directa con factores físico-geométricos que se emplean en la planificación. El conocimiento de estos factores facilitan la interpretación de las variaciones que se producen en las configuraciones dosimétricas obtenidas a partir de la utilización de dos o más campos y que expondremos a continuación. Para las representaciones de las distribuciones dosimétricas se asumirá el diagrama de meseta (plateau), en el cual se limita por las curvas del 90%. En estos diagramas se representarán también las curvas de 80 y 50 %, esta última con líneas discontinuas (Figura 37)

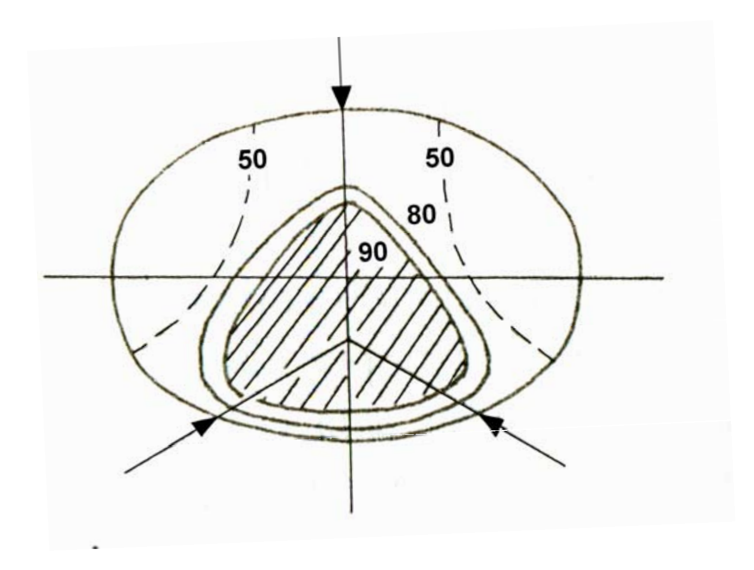


Figura 37- Representación de las curvas porcentuales de isodosis que se emplearan en las representaciones

En la *combinación de dos campos*, el parámetro más importante es la separación de los campos; la mínima variación de éste resulta en modificaciones de los detalles de la distribución de la dosis; por ejemplo, en un campo de 10x10 con radiación de cobalto, los cambios en la distribución de la dosis causados por un incremento de 50 a 100 cm de DFS (distancia fuente superficie), pueden ser correspondidos aproximadamente con una disminución de la separación del campo de 20 a 16 cm [170].

Cuando se usan dos campos directamente opuestos, por lo general se hace con la intención de irradiar con uniformidad todo el tejido entre ambos campos. Por tanto, un análisis de la técnica indicará la extensión del objeto que debe ser irradiado en la práctica. Sólo con una radiación de gran energía resulta posible utilizar campos opuestos para irradiar un blanco profundo, de tal manera que el tejido adyacente reciba una dosis menor.

La característica básica de la distribución a lo largo del eje central común a ambos campos; en ausencia de curvas de isodosis, la atención es dirigida a este eje.

La extensión en la cual la dosis disminuye hacia la periferia del bloque de tejido irradiado, depende de las características de las curvas simples de isodosis, las que a su vez dependen

del tipo y origen de la radiación, del grado de divergencia del haz y del sistema de colimación empleado. Este análisis concierne solamente a la distribución axial.

El eje central de la distribución de la dosis para un par de campos opuestos, depende de:

- Calidad del haz
- De la DFS
- De la medida del campo
- De la separación entre los campos.

Los tres primeros factores determinan los valores de porcentaje de dosis en profundidad de campos simples, que niegan efectos menores como aquellos debidos a la colimación. Se asumirá que los dos campos y la dosis aplicadas son iguales. Cuando un tumor esta situado cerca de la superficie del cuerpo, lo más recomendable es la irradiación por medio de dos campos oblicuos (unilaterales). Entre las desventajas que se atribuyen a esta técnica, figura la dificultad de llevar a cabo una dosis uniforme dentro de un volumen suficientemente grande.

Para lograr distribuciones dosimétricas adecuada en dos campos unilaterales, se adopta el método del filtrado del haz con cuñas. Con este procedimiento se consiguen modificaciones del haz de irradiación en determinadas localizaciones y una distribución optima de la dosis. Estos aditamentos accesorios son filtros de forma de cuña de metales de alta densidad que se interponen en el haz [170]. (Figura 38)

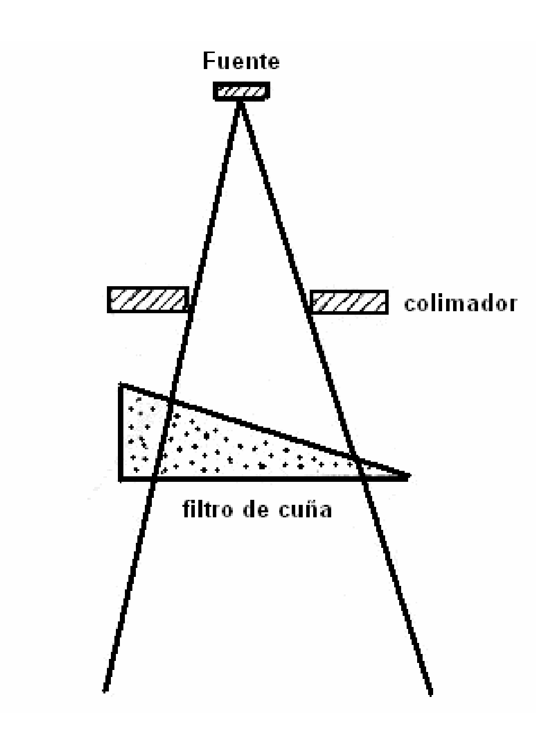


Figura 38- Situación del filtro de cuña interpuesto al paso del haz de irradiación

El ángulo de la isodosis de la cuña (ϕ) se define como el ángulo que se forma entre 50% de la curva de isodosis y el rayo central. De acuerdo con esta explicación, en un campo sin filtro el ángulo de isodosis es cero. En las planificaciones terapéuticas se pueden usar filtros en cuña que proporcionen ángulos desde 20^0 hasta 60^0 , fundamentalmente; por supuesto, esto depende de la distribución dosimétrica que se quiera obtener. (Fig.39)

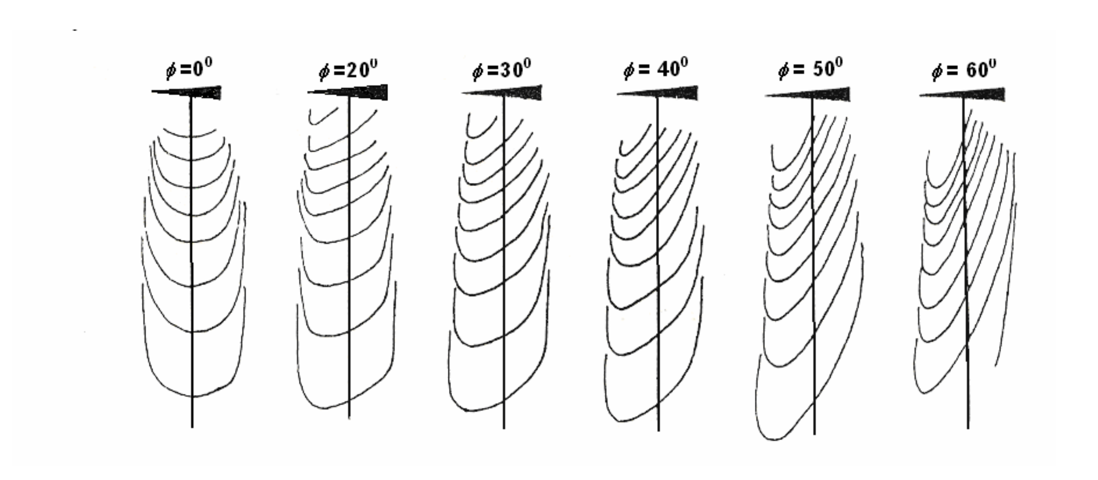


Figura 39- Se observa el incremento de la distorsión de la curva isodosis con respecto al aumento del ángulo ϕ

Otros parámetros además de ϕ , que pueden variar la configuración de la composición de las curvas de isodosis de dos campos oblicuos son la distancia entre los campos (***S***) y el ángulo que se forma en la intersección de éstos (θ)

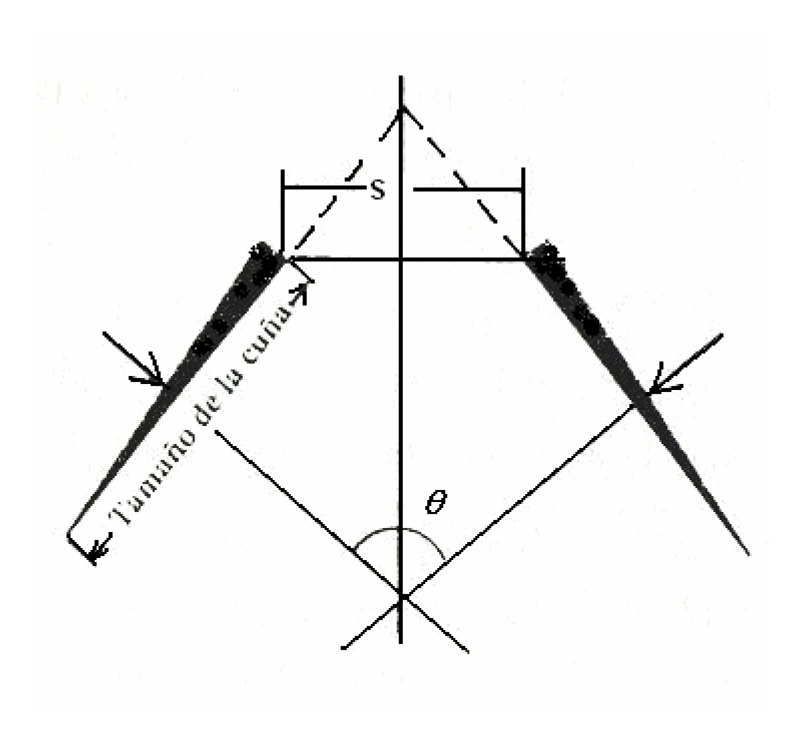


Figura 40- Factores básicos para configuraciones de dos campos con cuñas de materiles altamente densos

Tales variaciones se muestran por separado en los distintos diagramas de mesetas que se exponen a continuación, el parámetro que se somete a variación será denotado en el pie de la figura.

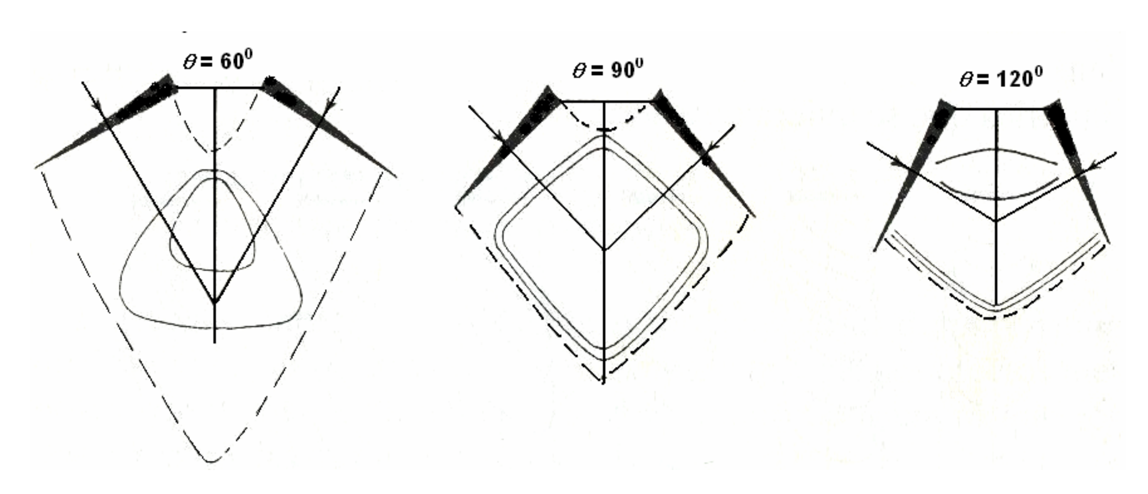


Figura 41- ϕ=40, S = 6 cm, rayos gamma Co-60

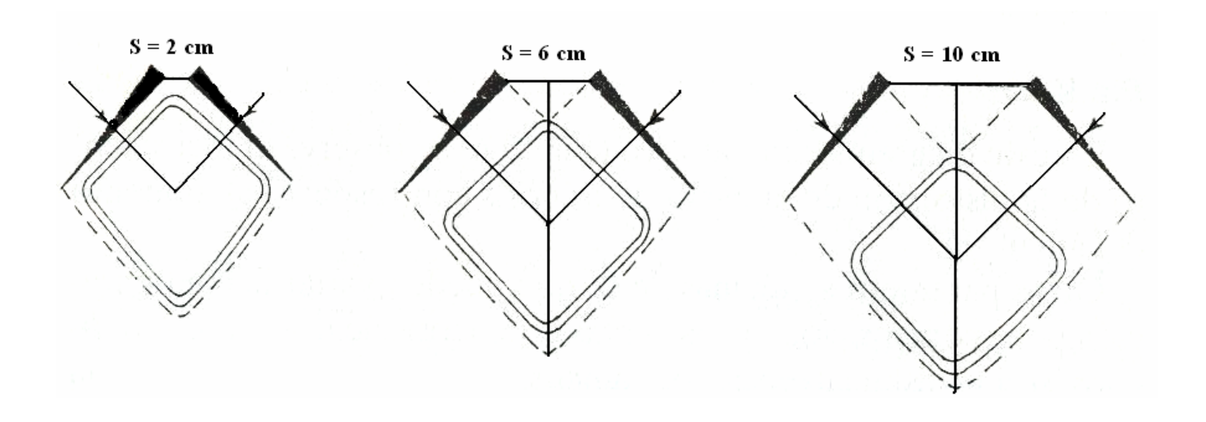


Figura 42- θ = 900, ϕ = 400, rayos gamma Co 60

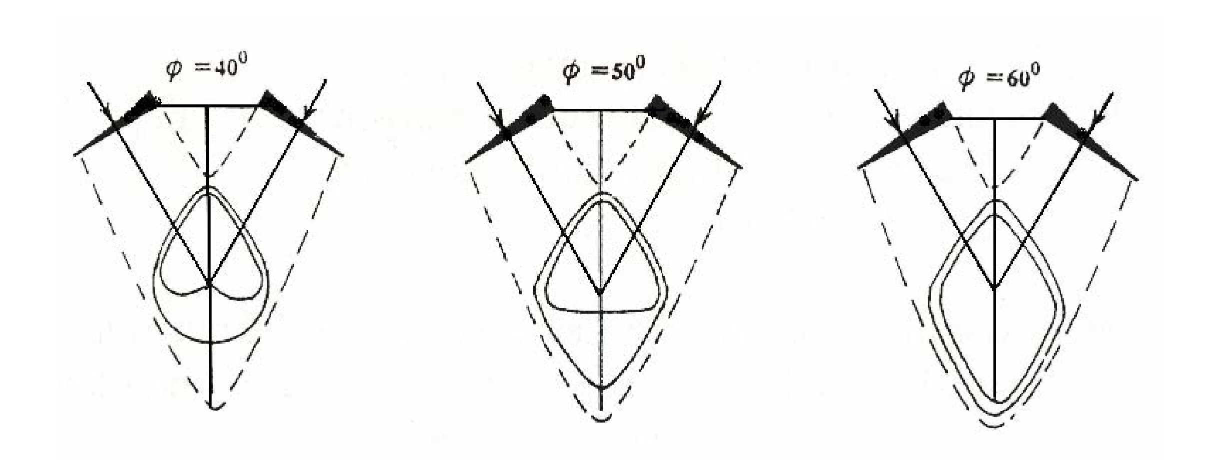


Figura 43-S = 6cm, θ = 600,rayos gamma Co 60

Como se puede apreciar en los tres ejemplos anteriores, la misma variación de ϕ, S ó θ repercute marcadamente en la distribución dosimétrica; o sea, apoyados en la variabilidad de éstos, podemos adecuar homogéneamente una isodosis en el blanco.

La irradiación por medio de tres campos, uno situado sobre un lado del cuerpo y los otros en el otro lado, constituye una técnica común con radiación de alta energía en la que, por lo general, la organización de los campos es simétrica. (Figura 44)

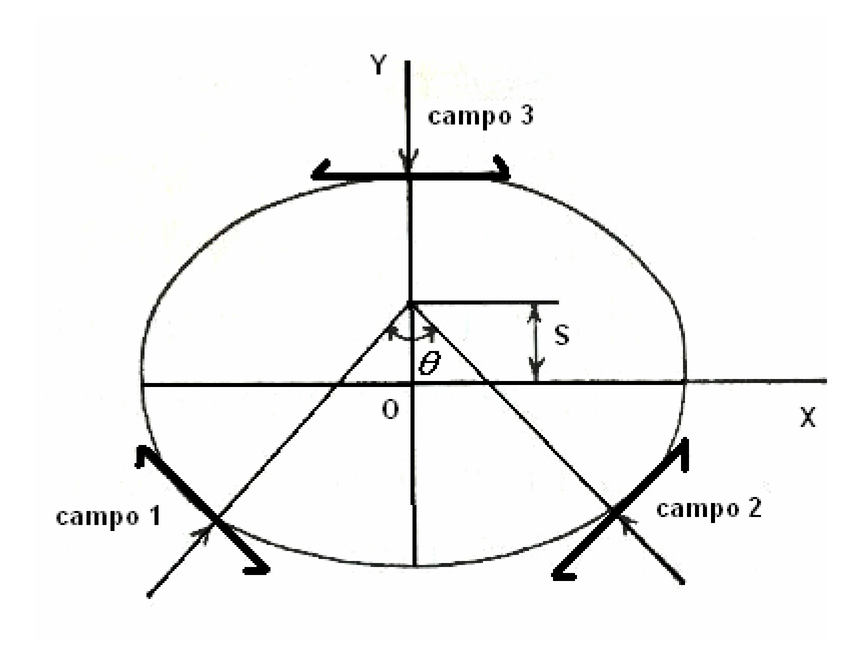


Figura 44- Combinación de tres campos de irradiación

La variaciones en la distribución de la dosis en el diagrama de meseta, están en dependencia de los cambios que sufren los siguientes parámetros

Dimensiones de los campos

Ángulo θ de la convergencia (campos 1 y 2)

Desplazamiento S del punto de convergencia en el eje Y en ambas direcciones del punto medio del cuerpo.

Ración (pesaje) de la dosis de los campos

Dimensiones de los campos: Las dimensiones del diagrama de meseta varían con una dependencia lineal en relación con el tamaño del campo y, por supuesto, la variabilidad de este parámetro se halla asociado directamente con el tamaño del volumen irradiado.

En los siguientes diagramas comparativos vemos los efectos producidos en la distribución de la dosis con la variación del tamaño de los campos (Figura 45)

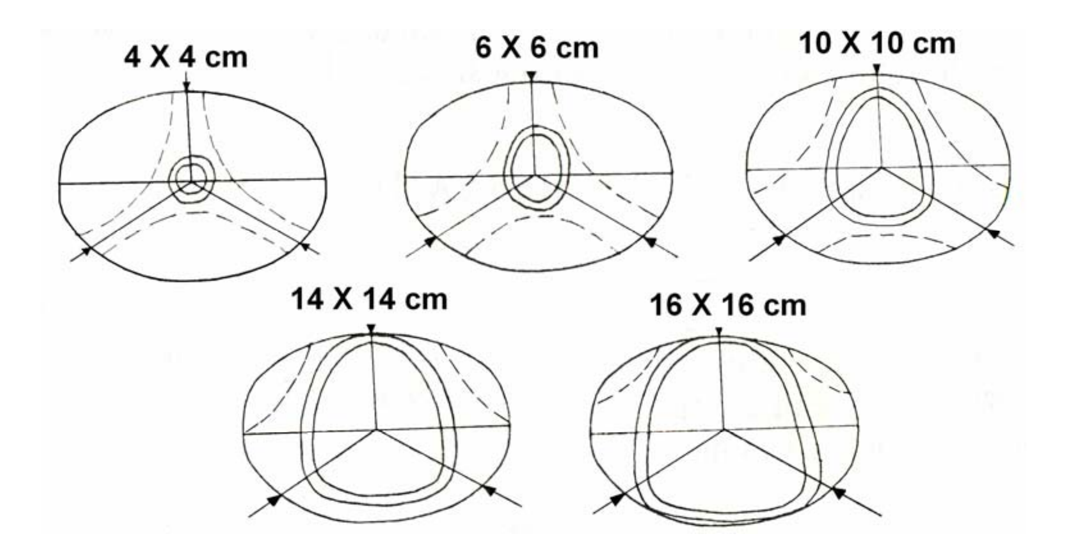


Figura 45- Parámetro que varia: Tamaño del campo (desde 4 x 4 cm hasta 16 x 16 cm), S = 0, θ=1200, Distancia Fuente Superficie (DFS) = constante

b) Ángulo θ de convergencia (campos 1 y 2): La variación de distribución de la dosis en el eje Y es directamente proporcional a la variación del ángulo θ . Una de las posibles formas de acomodar una distribución dosimétrica homogénea alrededor de un blanco que esté situado en cualquier posición a los largo del eje Y, es variar el ángulo de incidencia de los campos 1 y 2, simétricamente [170].

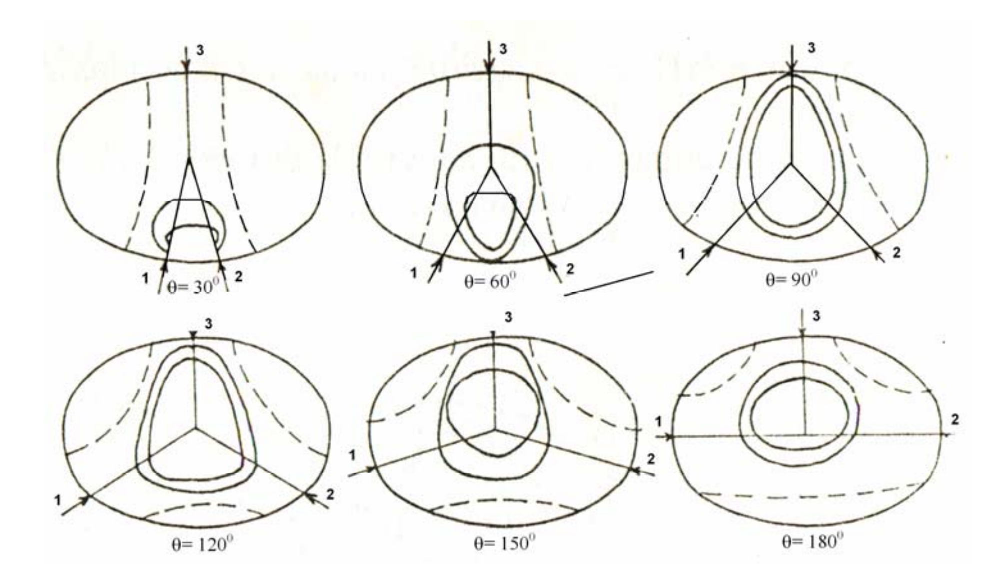


Figura 46- Parámetro que varia: θ desde 300 hasta 1800, S =0, DFS = constante, tamaño de los campos= constantes

Debe prestarse atención al hecho de que con la sola variación de θ ocurre un desplazamiento posteroanterior de la distribución dosimétrica.

c) Desplazamiento S del punto de convergencia en el eje Y en ambas direcciones del punto medio del cuerpo: Este punto puede desplazarse a lo largo del eje y en ambas direcciones del punto medio del sistema bidimensional. Si asumimos que el centro del sistema cartesiano tiene valor 0, entonces adoptaremos que los desplazamientos de este punto hacia abajo tendrán valores negativos y los que se desplacen hacia arriba, valores positivos. A continuación mostraremos un ejemplo que ilustra lo anteriormente expuesto (Figura 47)

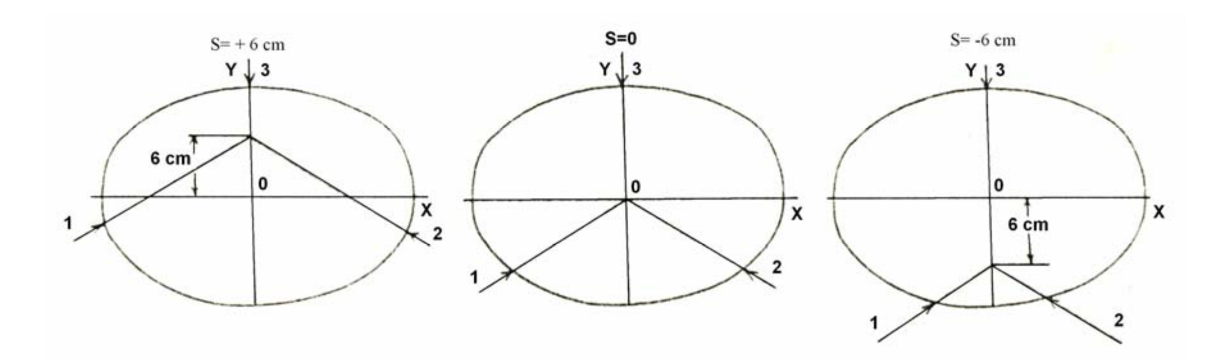


Figura 47- Valor que toma S al desplazarse del centro del sistema

El valor que toma S es la magnitud numérica del desplazamiento en centímetros. El ejemplo de la figura 48, muestra la distorsión que sufre el diagrama de meseta con las variaciones de S.

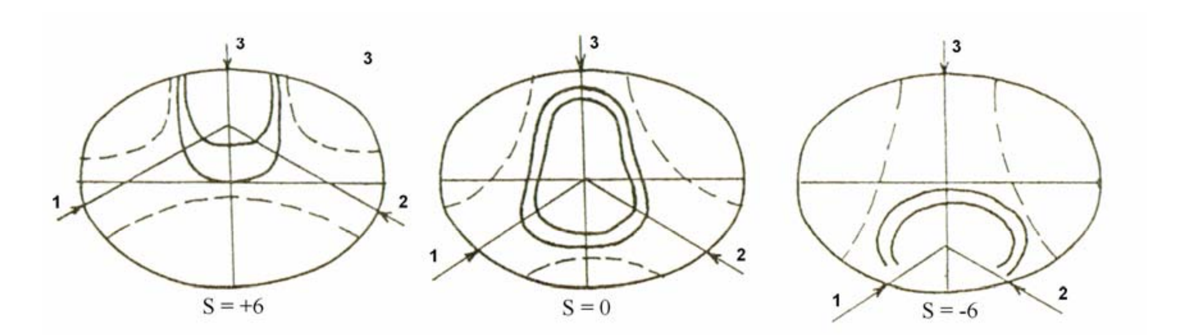


Figura 48- Parámetro que varia S, θ= 1200, DFS= constante, tamaño del campo=constante

d) Ración de la dosis de los campos (peso): Este parámetro también se conoce como pesaje de los campos y, consiste en suministrar partes desiguales de la dosis por una o más entradas del arreglo multicampo utilizado; se determina en niveles porcentuales con respecto a la dosis total suministrada en una planificación dosimétrica, por ejemplo, como en la figura 49.

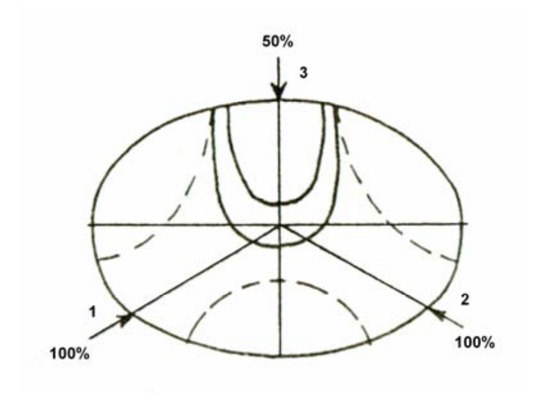


Figura 49- Distribución de pesos diferentes

Este diagrama muestra que el campo 3 ha sido pesado al 50% con respecto a los campos 1 y 2, tratando de desplazar la meseta hacia arriba. Esto demuestra que la variación de este parámetro resulta útil para lograr una configuración dosimétrica deseada. La variación de la

geometría de la isodosis resultante de distintos pesajes del campo 3 se expone en la figura 50.

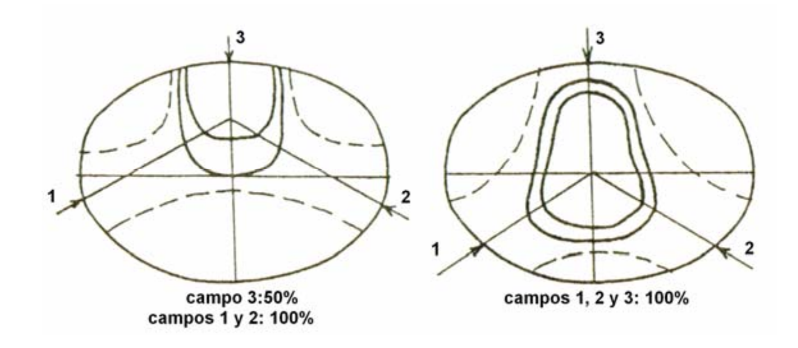


Figura 50- Parámetro que varia: peso de la dosis en el campo 3.DFS= constante, S=0, tamaño del campo: constante, θ = 1200

Otros factores que influyen en la configuración geométrica de la distribución de dosis en arreglos de tres campos (bilaterales), son la distancia fuente superficie y la energía del haz, aunque este último depende de la dotación técnica que posea el servicio de radioterapia, por lo que usualmente no se varia con tanta frecuencia [170]

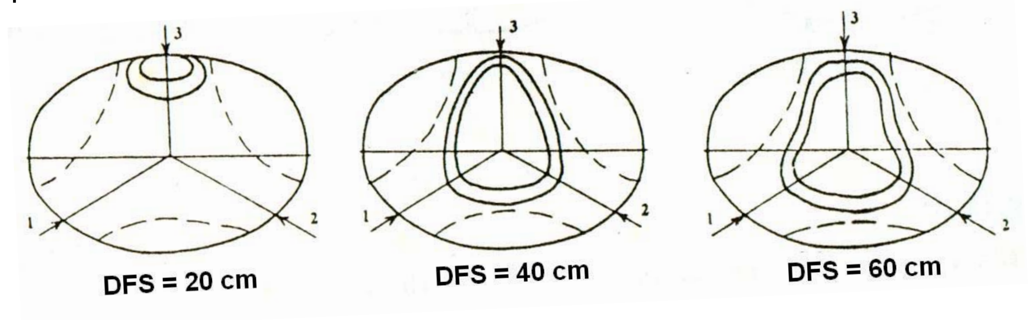


Figura 51- Efectos logrados mediante la variación de la distancia fuente superficie

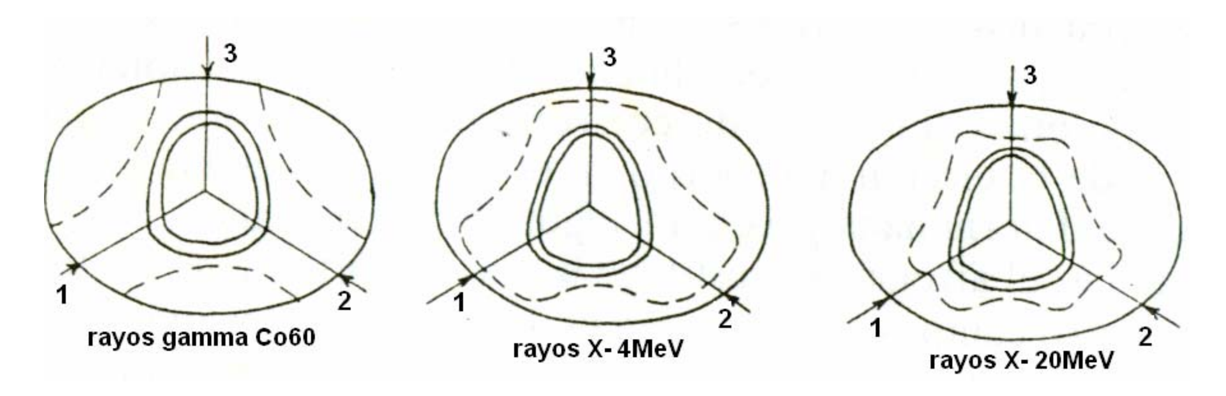


Figura 52- Efectos logrados en la configuración de los diagramas de mesetas con haces de diferentes energías

La técnica de combinación de cuatro campos es superior en complejidad a la de tres, ya que las probabilidades de variación de los parámetros que en ella influyen son numéricamente superiores y, como consecuencia, las posibilidades de configuración del diagrama de meseta resulta más flexible.

Cuatro campos mutuos en un ángulo correcto y que convergen en el centro del cuerpo irradiado, pueden ser orientados en cualquier ángulo de los ejes de una sección intermedia del cuerpo entre 0^0 (arreglo A) y 45^0 (arreglos B y C). Estos arreglos básicos para posibles combinaciones de cuatro campos se muestran en el diagrama de la figura 53.

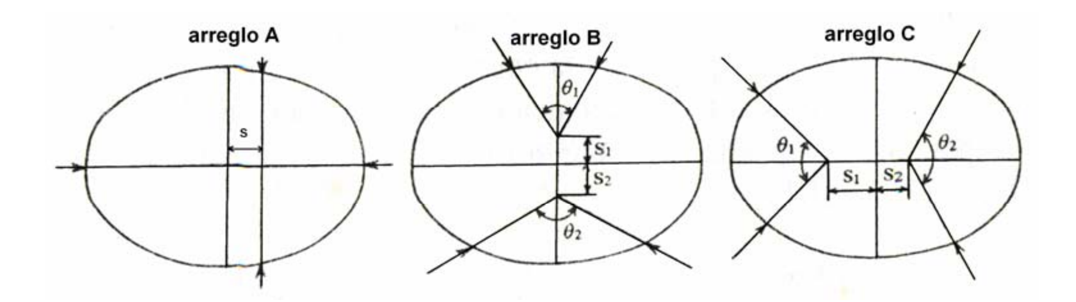


Figura 53- Arreglos básicos para posibles combinaciones

En la práctica rara vez se abandona la simetría axial de los arreglos básicos y, fundamentalmente, lo que se condiciona es el desplazamiento del punto de convergencia de los haces desde el centro de la sección del cuerpo en el eje X o en el eje Y, a una distancia S determinada y/o en un ángulo θ determinado.

Sin dudas el arreglo B constituye la más importante de las técnicas de los cuatro campos y, la mayoría de los tratamientos prácticos se encuentra en este grupo. El análisis de este arreglo considera mayor variabilidad de los factores θ y S. En el esquema de la figura 54 mostramos las variaciones que sufre el diagrama de meseta cuando se utiliza el arreglo A.

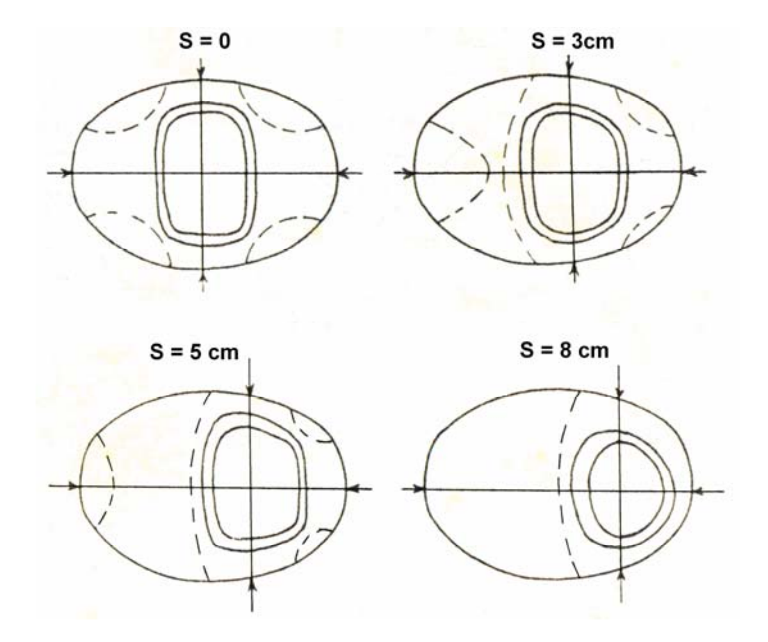


Figura 54- Variaciones de la configuración de las curvas de isodosis utilizando el arreglo A

Los arreglos B y C permiten más probabilidades de combinar los cuatro haces de irradiación a partir de las variaciones provocadas en $\theta 1$, $\theta 2$ y S1, S2. (fig.55)

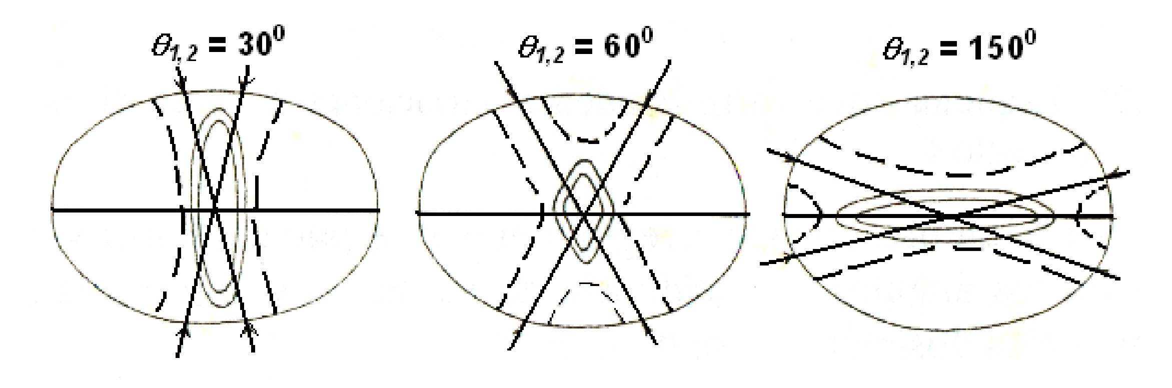


Figura 55-Configuración del diagrama cuando varía el mismo valor en los dos ángulos

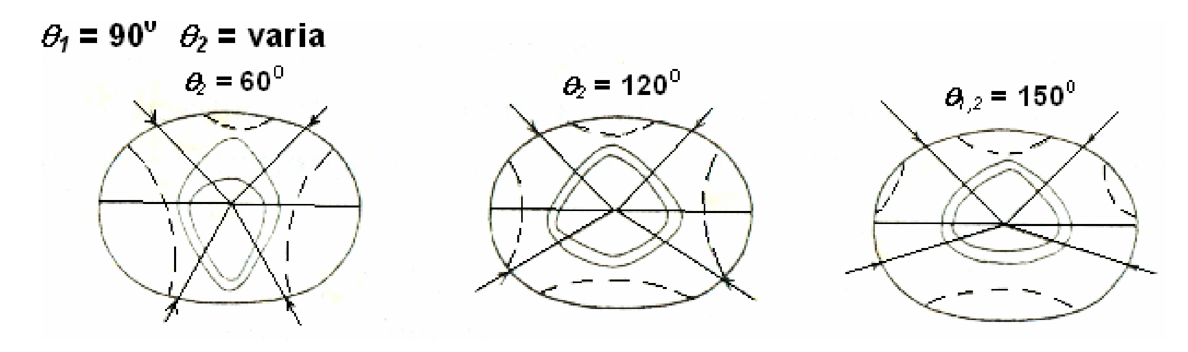


Figura 56- Configuración del diagrama cuando solamente varia uno de los ángulos

Al variar los valores de S en ambos ejes se puede lograr distribuciones dosimétricas ideales y, acomodar una dosis homogénea alrededor del blanco.

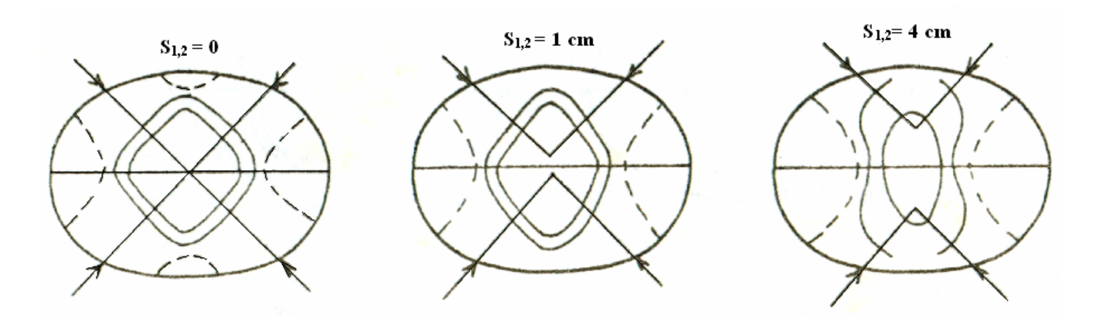


Figura 57- Diagrama donde se varia S1 y S2 en el eje Y en la misma magnitud

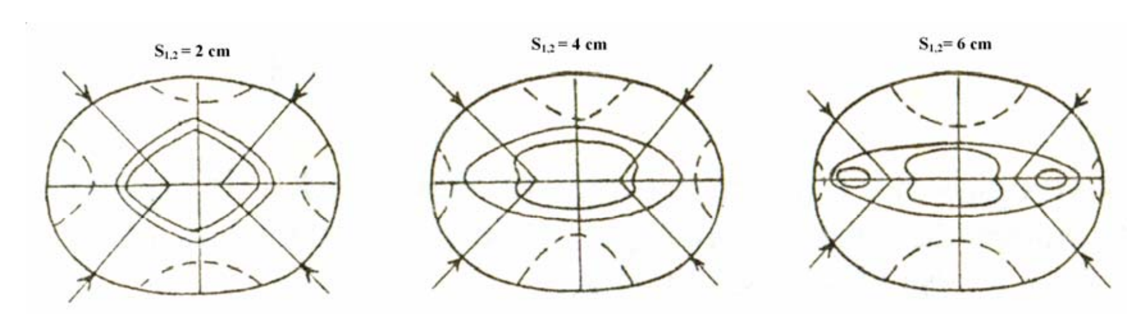


Figura 58- Esquemas que corresponden a variaciones de S en el eje X (arreglo C)

Por consiguiente, en este arreglo también se pueden hacer variaciones en los ángulos de incidencia de los haces y lograr cuantas distribuciones dosimétricas se deseen. Hasta aquí se ha ejemplificado la influencia de las variación de parámetros aislados en la configuración de la dosimetría en el cuerpo con arreglos a dos, tres y cuatro campos, pero, por supuesto, para una planificación física con la localización determinada, el uso y la combinación de todos los parámetros anteriormente descritos, resulta casi obligatorio.

Pocas veces se utilizan más de cinco campos, por lo general, es preferible usar técnicas rotacionales que suplan el empleo de seis o más campos estacionarios.

En la actualidad todo el proceso de planificación de los tratamientos radioterapéuticos se realizan mediante programas informáticos capaces de simular y realizar todas las correcciones por absorción de la radiación por las distintas densidades de los tejidos, correcciones por decaimiento del radioisótopo utilizado y demás factores que influyen en la interacción de las radiaciones con el tejido humano, lográndose de esta manera minimizar los errores y contribuyendo a la excelencia y calidad de esta actividad terapéutica. (Figura 59)

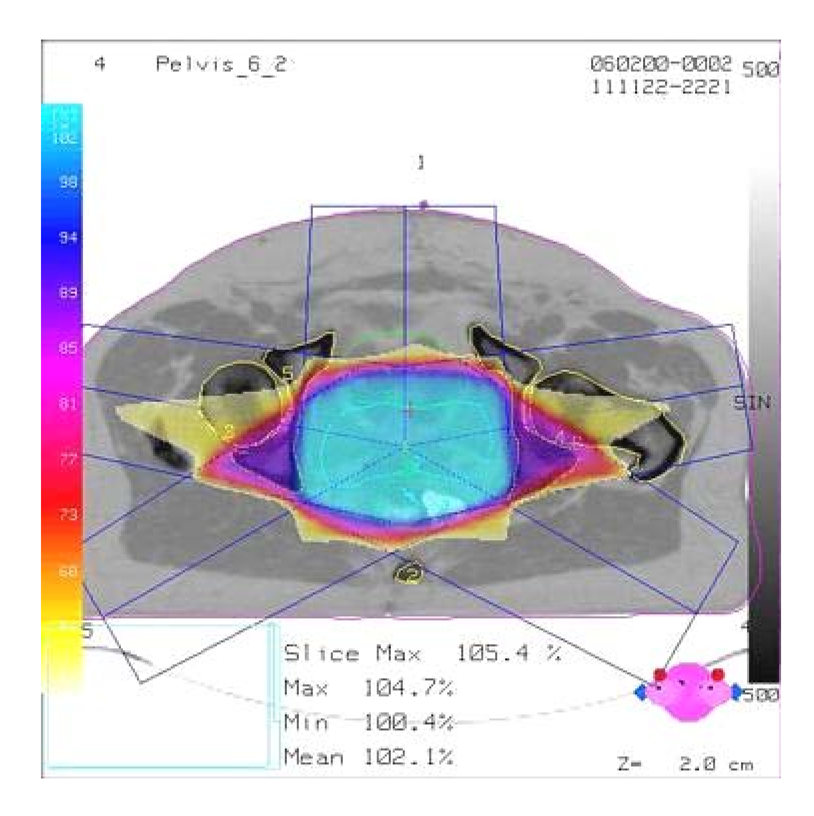


Figura 59- Planificación computarizada sobre un corte anatómico donde esta representado el blanco

II.5.b-Radioterapia Interna (RI)

Como se ha planteado con anterioridad, el propósito fundamental de cualquier técnica de radioterapia es dirigir la radiación a la parte deseada del cuerpo y minimizar la irradiación a los tejidos sanos. La radioterapia usada mediante fuentes pequeñas selladas, radionúclidos metabolizantes, etc, que pueden ser colocados cerca de la superficie del cuerpo, en cavidades naturales o alternativamente implantadas directamente dentro del tejido se conoce habitualmente como radioterapia interna o braquiterapia. [170]

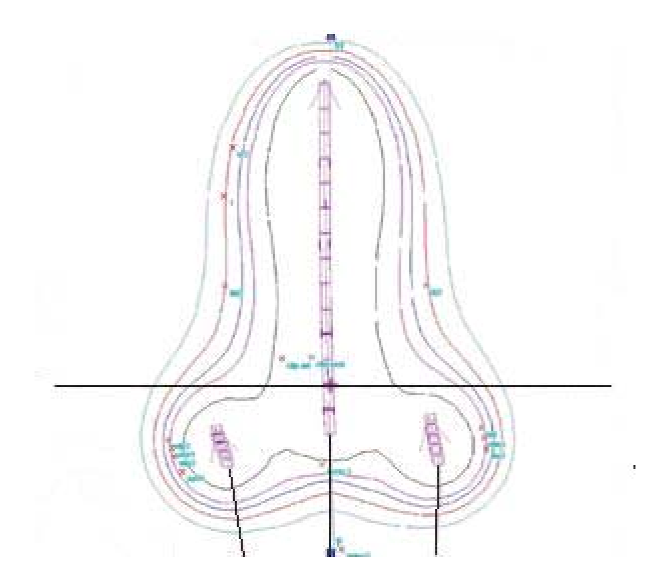


Figura 60- Representación de las curvas de isodosis de una planificación de un tratamiento intracavitario de cuello de útero con fuentes selladas

Otra de las forma comunes de la ***RI*** es cuando actúa en función de las radiaciones beta (-), que se comportan como electrones. A diferencia de la terapia externa, irradia en el lugar las lesiones profundas, sea mediante un proceso de vía metabólica, sea mediante un método mecánico.

Las técnicas que se sirven de la vía metabólica consisten en la administración oral o intravascular de cierta cantidad adecuada de un radionúclido determinado que, por sus características químicas, se concentra selectivamente, al cabo de cierto tiempo, en el órgano o tejido a tratar, al que llamamos volumen de interés. Mediante esta técnica, el volumen de interés resulta afectado por el material radiactivo, de modo que sea posible la irradiación prácticamente local con las dosis programadas. Los requisitos principales de este método son:(a) el empleo de radionúclidos de vida relativamente corta, como por ejemplo, ^{32}P en forma iónica y ^{131}I en solución; (b) afinidad del radionúclido administrado (en función de su naturaleza química) por el órgano o tejido a tratarse; (c) ausencia de toxicidad y (d) el carácter metabolizable y soluble de la forma química empleada. Obviamente, la suma de estas condiciones se acerca a lo deseado, puesto que, con la adecuada elección de la

energía de radiación, la mayor parte de la dosis administrada puede resultar confinada al volumen de interés; el carácter selectivo de la captación reduce al mínimo la dosis que afecta al resto del organismo y la concentración casi uniforme del contaminante en la lesión permite mayor uniformidad de la dosis de radiación de la que se puede alcanzar mediante la técnica radiante externa.

El acceso por vía mecánica consiste en la incorporación del material radiactivo en el volumen de interés, prescindiendo del proceso metabólico.

El radionúclido, en la forma física de coloide o de aglutinado, se inyecta en el interior de la lesión mediante un trocar, configurando lo que puede asimilarse a una implantación de inyección [171].

Los requisitos fundamentales de este procedimiento son: (a) que la sustancia empleada sea insoluble para que no migre fuera del lugar de su aplicación; (b) que la forma química sea atóxica y (c) que el radionúclido sea beta emisor puro, como el fósforo radiactivo ^{32}P, emisor beta puro en forma de fosfato crómico coloidal; el ^{198}Au tiene respecto de éste la desventaja de ser, además, emisor gamma, lo que implica irradiación más allá de los límites de la lesión. Con este método la selectividad deja de ser un factor limitante, puesto que se llega a la lesión con la dosis de radiactividad deseada sin irradiar tejidos sanos interpuestos; no existe irradiación en los sitios por donde circularía la sustancia radiactiva si accediera a la lesión por la vía metabólica.

Por esta misma razón, tampoco hay irradiación en los emuntorios (riñón y vejiga), ya que no hay eliminación del preparado porque este es insoluble. Empleando un emisor beta puro se consigue el confinamiento de la radiación en el "*volumen de interés*", lo que satisface al

máximo la premisa de no irradiar tejido sano. Los radionúclidos usados, según se dijo, son el ^{32}P, beta emisor puro, y el ^{198}Au que, además, emite radiaciones gamma.

Los radiocoloides responden a dos variedades de presentación, según el tamaño de las partículas y, sus aplicaciones son distintas: las micropartículas, submicrónicas (entre 40 y 80 milimicrones, de preferencia el fosfato crómico coloidal), más pequeñas que cualquier célula; y las macropartículas, unas mil veces mayores que las anteriores. La indicación más precisa para el empleo de las micropartículas beta submicrónicas es la profilaxis de la implantación de colgajos celulares neoplásicos desprendidos por manipulación quirúrgica durante las maniobras de exéresis de tumores sólidos. Estas partículas son forzosamente absorbidas por los detritus (el coloide se fija íntimamente a las membranas de las células) y la irradiación de contacto resultante impedirá que éstos aniden y proliferen, previniéndose así las metástasis a distancia.

De igual modo, fuera del terreno quirúrgico, tras la irradiación en el interior de la lesión primaria, lo mismo ocurrirá con las células que eventualmente hayan migrado por las vías linfáticas eferentes, ya que el coloide se difunde por ellas; de este modo, pueden atacarse las micrometástasis y metastasis latentes que escaparían aún al más radical de los métodos quirúrgicos o a la radioterapia convencional.

En síntesis, de lo expuesto, resulta que la ***RI*** es un método más racional que la ***RE*** para el tratamiento de las lesiones neoplásicas pues causa menor daño al individuo como un todo y a la zona adyacente al *volumen de interés* en razón del alcance limitado de las partículas beta. Dentro de este tipo de terapia, hasta hoy, el empleo de fuentes radiactivas no metabolizables es el que ofrece las mejores posibilidades para la localización y el tratamiento correcto, con agresión mínima al organismo en la medida en que las fuentes no solubles lleguen a la lesión prescindiendo de mecanismos metabólicos y no migren del lugar

de aplicación. No obstante, puede conseguirse, con ciertos radionúclidos, una migración local y controlada, que puede ser deseable en el caso de la eventual dispersión de células neoplásicas por las vías linfáticas eferentes de la lesión. El empleo de fuentes radiactivas metabolizables sólo ha sido exitoso hasta ahora en el tratamiento con ^{131}I de las tiroideopatías y, aunque el proceso sea de índole distinta, cabe mencionar también el uso del fósforo radiactivo (^{32}P) para el tratamiento de la policitemia vera. Los radionúclidos comúnmente más utilizados se muestran en la siguiente tabla

ISÓTOPO	PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN	ISÓTOPO	PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN
^{32}P	14.3 días	^{137}Cs	30 años
^{60}Co	5.26 años	^{192}Ir	74.2 días
^{90}Sr	28.8 años	^{198}Au	2.7 días
^{125}I	60.25 días	^{222}Rn	3.82 días
^{131}I	8.06 días	^{226}Rn	1.622 años

Tabla.1

II.6- Protección radiológica

La radiación ha sido parte de la historia de nuestro planeta desde que se formó el Sistema Solar. Hoy día, la Tierra es bombardeada continuamente por partículas provenientes del centro de nuestra galaxia y de otras alejadas millones de años luz. Pero no toda la radiación recibida sobre la Tierra es extraterrestre, ya que en el interior y en la superficie del planeta existen núcleos radiactivos que, desde que fueron creados al formarse el Sistema Solar, emiten espontáneamente diferentes formas de radiación. Desde comienzos del siglo XX, a esta radiación natural, o "de fondo", se le ha sumado la radiación que el ser humano

aprendió a producir para satisfacer sus necesidades y sus intereses. La radiación producida por el ser humano (a veces denominada radiación artificial) causa aproximadamente el 20% de la irradiación total promedio en el mundo actual; el resto es de origen natural.

II.6.a-Radiación natural

La cantidad de radiación natural recibida por un ser humano es relativamente similar en todas partes del planeta y se estima que no ha variado demasiado en el transcurso del tiempo. Se pueden distinguir dos mecanismos principales de irradiación: externa, cuando la radiación proviene de fuera del cuerpo, e interna, cuando el elemento radiactivo emisor ha sido ingerido o inhalado y, por lo tanto se encuentra ubicado adentro del cuerpo del individuo. [172] Los responsables principales de la *irradiación externa* son los *rayos cósmicos* de origen extraterrestre. Esta radiación llega a nuestro planeta después de viajar por miles de años desde alguna estrella lejana.

Durante las diversas etapas de la evolución de una estrella, ésta emite rayos X, rayos gamma, ondas de radio, neutrones, protones o núcleos más pesados que viajan por el vacío espacio interestelar a la velocidad de la luz o cerca de ella, hasta chocar con alguna molécula o átomo.

La probabilidad de chocar con la Tierra es pequeñísima, pero la cantidad de radiación es inmensa.

Los rayos cósmicos que se dirigen hacia la Tierra, principalmente protones y partículas alfa, encuentran primero la atmósfera e interactúan con los núcleos de átomos presentes en ella. En este sentido, la capa de aire que está encima de nosotros actúa como un techo protector.

La interacción de las partículas cósmicas con los núcleos en el aire produce reacciones nucleares en que se crean nuevas partículas que continúan el viaje hacia la superficie. Las

partículas con carga eléctrica van ionizando y excitando las moléculas del aire ocasionando una pérdida gradual de la energía original. Una fracción mínima de los rayos cósmicos primarios logra llegar hasta la superficie terrestre y son principalmente, las partículas llamadas **muones*, producidas en la alta atmósfera por los rayos primarios que constituyen el espectro de radiación cósmica en la superficie.

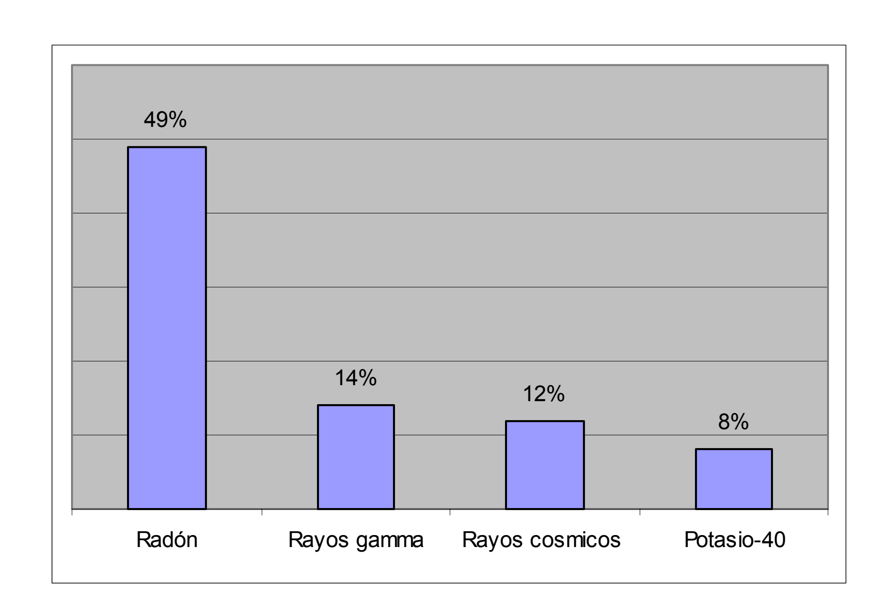
La otra fuente importante de irradiación externa la constituyen los *rayos gamma* emitidos por núcleos radiactivos presentes en el suelo o el aire. Estos núcleos inestables pudieron ser formados por la interacción de rayos cósmicos con el aire o pueden existir en la corteza terrestre, desde sus orígenes.

La contribución de los primeros a la dosis externa es insignificante. La cantidad de radiación al aire libre en un lugar está íntimamente relacionada con la presencia de núcleos radiactivos en el suelo.

La *irradiación interna* se debe a la inhalación de polvo que contenga en suspensión partículas radiactivas, así como a la ingestión de agua y alimentos que hayan incorporado algún elemento inestable a su composición. Tal como se mencionó previamente, los núcleos radiactivos responsables de la radiación natural terrestre pueden provenir de reacciones de rayos cósmicos con el aire, o haber sido formados al comienzo de nuestro sistema planetario. Entre los primeros se pueden mencionar el tritio, el carbono-14, el berilio-7 y el sodio-22. Entre los elementos que ingresan al organismo por las vías respiratorias se encuentran el uranio, el torio y los isótopos polonio-210 y plomo-210. (Aprovechamos para señalar que en los pulmones de fumadores la concentración de estos dos núcleos radiactivos es 50% superior a aquella en los pulmones de los no fumadores.)

** El muón es esencialmente un electrón pesado y, puede tener carga positiva o negativa. Es aproximadamente 200 veces más pesado que un electrón.*

Todos estos elementos son sólidos y su inhalación ocurre al respirar partículas de polvo a las cuales se han adherido. Pero la fuente principal de irradiación interna la constituye la inhalación del gas *radón*. Este elemento se produce en los decaimientos radiactivos del uranio y del torio y es a su vez inestable, transformándose en una partícula alfa y un núcleo de polonio. Si el radón es respirado y no decae, puede volver a salir junto con el aire expirado. Pero si decae mientras se encuentra en los pulmones, el núcleo de polonio, que es un elemento sólido, se puede quedar adherido al tejido pulmonar y desde ahí continuar emitiendo radiación, pues él también es radiactivo. En la gráfica 1 se representan las principales fuentes de radiación natural, como fracción del equivalente de dosis promedio.



Gráfica 1- Principales fuentes de radiación. Se indican los porcentajes con que cada fuente contribuye a la dosis total promedio en el mundo actual que es un 83 %.

A este 83 % se le añade el 17 % de radiación producida por el ser humano que se divide fundamentalmente en usos médicos 16%, ensayos nucleares 0.8% y energía nuclear menos del 0.4% [173]

II.6.b-Radiación producida por el ser humano

La fuente más importante de exposición a radiación producida por el ser humano, son los exámenes médicos que utilizan *rayos* X. Los valores promedio para una población dependen de la frecuencia con que los individuos se someten a un examen radiológico.

En los países industrializados se estima que se toman entre 300 y 900 radiografías al año por cada 1 000 habitantes, mientras que en el llamado Tercer Mundo, la frecuencia es diez veces menor. (*Organización Panamericana de la Salud.2008)* La dosis individual varía mucho de una persona a otra; obviamente, es nula para alguien que no se toma ninguna radiografía y mucho mayor que el promedio para quien se somete a varios exámenes. Hay una tendencia mundial a aumentar el empleo de radiografías, debido a la extensión de los servicios de salud, tanto en países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo; simultaneamente, la dosis debida a cada radiografía tiende a disminuir debido a nuevas técnicas, tanto en el diseño de los tubos de rayos X como en las películas radiográficas, al mejor entrenamiento del personal a cargo de tomar los exámenes y, a la imposición de reglas de seguridad radiológica más estrictas.

Ambos factores actúan al mismo tiempo, lo que hace suponer que los valores promedio citados no variarán demasiado en los próximos años. Otras prácticas médicas de diagnóstico, como la medicina nuclear, producen dosis mucho menores que los exámenes radiológicos y además, son empleadas en un número mucho menor de pacientes. Por el contrario, la radioterapia irradia una zona bien localizada del paciente con valores de dosis que son 10 000 o más veces los valores naturales [174].

Debido a que esta gran cantidad de radiación es recibida por un paciente cuya vida está en peligro a causa de un tumor maligno, se considera que cualquier efecto negativo que pudiera causar la irradiación es irrelevante frente al gran beneficio de la posible curación o paliación de su padecimiento.

Por todo lo expuesto hasta aquí se desprende que es importante incorporar los conceptos de protección radiológica en la planificación de los servicios de diagnóstico y tratamiento, así como coordinar los métodos de garantía de la calidad y seguridad radiológica.

II.6.c-Orígenes de la protección radiológica

Apenas descubiertos los rayos X y la radiactividad, su uso se generalizó en los hospitales y laboratorios del mundo entero. A comienzos de nuestro siglo los tubos de rayos X se producían masivamente y se distribuían a todos los países.

Por tratarse de fenómenos recién descubiertos, cuya naturaleza ni siquiera se entendía totalmente, no se tomaban precauciones y fueron muchos los que sufrieron los efectos negativos de una exposición excesiva e incontrolada. Las personas más expuestas a estas nuevas formas de radiación fueron los médicos radiólogos que utilizaban los rayos X y los científicos que manipulaban material radiactivo. Irene Curie, hija de Pierre y Marie, quien descubriera, junto con Frederic Joliot la radiactividad artificial, murió a mediados de este siglo aquejada de leucemia, seguramente un efecto biológico tardío de la radiación recibida durante su juventud. Como claro ejemplo de la ignorancia sobre los efectos de la radiación, hasta hace no muchos años, una conocida zapatería de la ciudad de México (igual que otras en el mundo) para promover sus ventas, ofrecía a sus clientes imágenes radiológicas "en vivo" del pie adentro del zapato.

Debido a que fueron precisamente los médicos y los físicos las primeras víctimas del exceso de radiación, rápidamente se tomó conciencia del problema dentro de la comunidad científica. En 1920 se erigió en Hamburgo un monumento que recuerda a más de 100 pioneros radiólogos fallecidos a causa de la exposición excesiva durante el ejercicio de su profesión. Los primeros efectos identificados fueron los de carácter agudo: eritema cutáneo, cataratas y descenso de la producción de células sanguíneas, cuando se recibían dosis

más de mil veces mayores que las que recibe al año una persona corriente a partir de la radiación natural. Más tarde se descubrieron los efectos carcinogénicos (estudio en pacientes que aplicaban radio en las esferas de los relojes). Después de Hiroshima y Nagasaki epidemiológicamente se demostró que la probabilidad del cáncer aumentaba con la dosis absorbida de radiación. El primer estudio para establecer niveles aceptables de irradiación fue hecho por la Sociedad Americana de Rayos Roentgen y la Sociedad Americana del Radio en 1922 y, las primeras unidades de dosis de radiación se definieron con base en la exposición que llegaba a provocar quemaduras en la piel del paciente.

II.6.d- Límites de dosis

Las personas que trabajan con radiaciones y en consecuencia los pacientes, están expuestos en forma inevitable a dosis pequeñas de radiación en circunstancias normales. Cada exposición a las radiaciones puede tener efectos negativos [174].

El objetivo de la protección radiológica es permitir el aprovechamiento de la radiación, en todas sus formas conocidas, con un riesgo aceptable tanto para los individuos que la manejan como para la población en general y las generaciones futuras. Debido a que la radiación es potencialmente dañina, no debería permitirse ninguna exposición innecesaria. El principio que gobierna la protección radiológica en caso de exposición se conoce con el nombre de ALARA (as low as reasonably attainable) que se traduce como: *tan poca radiación como sea posible lograr de modo razonable.*

Cada país cuenta con un organismo encargado de hacer cumplir la reglamentación existente en el área de seguridad radiológica, leyes que generalmente se han inspirado en las recomendaciones de la OIEA (Organización Internacional de Energía Atómica).

En Cuba, es el CPHR (Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones) [175]. Las recomendaciones del CPHR fijan límites para la dosis máxima que podrían recibir los

trabajadores cuya actividad implica el exponerse a la radiación. Estos "trabajadores de la radiación", denominados también como *ocupacionalmente expuestos,* son los médicos radiólogos, nucleares y radioterapeutas, especialista en física médica, los técnicos que los ayudan en la práctica de su trabajo profesional, los investigadores en física atómica y nuclear que utilizan fuentes de radiación y los operadores de reactores nucleares, entre otros.

Este grupo debe estar controlado individualmente de manera continua por medio del uso de dosímetros personales, instrumentos de medición que se llevan sobre el cuerpo y que marcan la cantidad de radiación recibida por cada trabajador. El CPHR ha definido límites de equivalente de dosis para trabajadores de la radiación con el fin de limitar la aparición de efectos biológicos a un nivel considerado aceptable, en comparación con los riesgos a que se expone un trabajador en cualquier otra actividad profesional moderna.

II.6.e- Acción biológica de las radiaciones

La acción biológica de las radiaciones ionizantes y no ionizantes depende sobre todo de sus niveles de energía y en segundo lugar de varios factores como, tipo de tejido irradiado, área corporal, edad del individuo, sexo, frecuencia y acumulación de dosis, entre otros.

Los efectos biológicos de las radiaciones se producen como consecuencia de las alteraciones que éstas causan en las estructuras de las células. Debido a ello se producen cambios químicos que modifican o erradican las funciones celulares. Los cambios que se producen en las células, luego en los tejidos y finalmente en el organismo pueden tardar en manifestarse desde minutos hasta muchos años después de ocurrida la exposición [176].

De acuerdo con la energía, están las radiaciones de bajo nivel que actúan ya sea superficialmente (rayos ultravioleta, microondas, infrarrojos, rayos X blandos) o con

liberación de energía en dosis pequeñas que originan excitación electrónica y absorción térmica por las moléculas y tejidos (rayos ultravioleta duros, microondas, diatermias, rayos ß de baja energía, rayos X semiduros) que llegan a originar efectos somáticos a largo plazo, por ejemplo, la inducción de cáncer en tejidos sensitivos como son la médula ósea (leucemia), tiroides, ganglios linfáticos y tejido reticular, tracto gastrointestinal (faringe, estómago e intestino grueso); inducción de cataratas, infertilidad temporal, defectos de crecimiento y desarrollo fetal. Se consideran dosis bajas a las menores al máximo permisible de 5 mSv (ver anexo 5) por año. [177] Las radiaciones de alto nivel energético implican dosis de radiación ionizante capaces no sólo de inducir más rápidamente efectos somáticos a largo plazo, sino también efectos genéticos y hasta síndromes agudos con probabilidad de muerte caracterizados por irradiación en todo el cuerpo de dosis entre 1 y 6 Sv que produce un conjunto de síntomas como náuseas, vómito, fatiga, pérdida del cabello, irritación generalizada en las membranas del cuerpo, hemorragia, diarrea, anemia y postración total[178].

No todas las células y tejidos son igualmente sensibles o vulnerables a las radiaciones. Las células más activas y que crecen con mayor rapidez, tienden a ser las más radiosensibles en un tejido cualquiera, así como las que son menos especializadas. Por esta razón, los tejidos se agrupan según su sensibilidad, en orden de radiosensibilidad: Tejido linfático, especialmente los linfocitos; tejido hematopoyético, productor de glóbulos blancos y plaquetas; tejido epitelial del tracto digestivo; tejido gonadal, los testículos son más sensibles que los ovarios; el folículo piloso, raíz del cabello; células endoteliales de los vasos sanguíneos y el peritoneo; epitelio del hígado y suprarrenales; otros tejidos: óseo, muscular y sistema nervioso.

Varios factores influyen en los efectos biológicos que causan las radiaciones, entre ellos son significativos el tipo de radiación que se usa, la dosis que se suministra, cuánto dura la

exposición, el tipo de célula o tejido que es irradiado, sus características funcionales y qué parte del organismo se irradia.

Entre mayor sea la cantidad de radiación recibida, más agudos serán los efectos que se producen, pues existen relaciones cuantitativas entre la extensión del daño y su dosis, pero aun así persiste el problema para establecer las dosis límites debido a que no hay un umbral que pueda determinar la aparición de dosis mínimas.

II.6.f- Clasificación de los efectos producidos por las radiaciones ionizantes

Son muchas las posibles clasificaciones que se podrían realizar sobre los efectos de las radiaciones ionizantes. Sin embargo, nos vamos a referir aquí a aquella que más frecuentemente se utiliza en protección radiológica y que hace referencia a la transmisión celular de los efectos y a su relación con la dosis.

En primer lugar, los efectos pueden clasificarse en:

Somáticos y genéticos, en función de si son inducidos sobre las células de la línea somática o germinal. El daño somático se manifiesta durante la vida del individuo irradiado, mientras que los efectos genéticos son inducidos sobre su descendencia. Los efectos somáticos se dividen a su vez en *inmediatos y tardíos*, en función del tiempo transcurrido desde su irradiación. A su vez y en función de la incidencia que tiene la radiación sobre los efectos, éstos se clasifican en *deterministas y en estocásticos*.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica, ICRP, publicación 60, 1990, define los efectos estocásticos como aquéllos para los cuales la *probabilidad* de que un efecto ocurra, más que su severidad, es función de la dosis, sin umbral. Los efectos deterministas son aquellos para los cuales la severidad del efecto varía con la dosis, siendo necesario un valor

umbral. Los efectos estocásticos se pueden presentar tanto en el individuo expuesto (efectos estocásticos somáticos, como sería en caso de la carcinogénesis), como también en la descendencia (efectos estocásticos hereditarios).

Al igual que en la irradiación de células no germinales, las células germinales irradiadas pueden experimentar efectos deterministas (esterilidad); efectos que evidentemente no son hereditarios y por lo tanto no hemos de identificar los efectos producidos por la irradiación de las gónadas con los efectos genéticos.

En la tabla 2 se presenta un esquema aclaratorio de estos conceptos.

	Efecto estocástico ***(la gravedad dependen de la dosis. Se relaciona con las mutaciones)***	***Efecto determinista*** ***(la gravedad depende de la dosis. Se relaciona con la letalidad)***
Efectos hereditarios	***Ejemplo: Anormalidades hereditarias***	
Efectos somáticos	***Ejemplo: Carcinogénesis***	***Ejemplo: Anemias, caída de cabello, esterilidad***

Tabla2-Clasificación de los tipos de efectos biológicos estocásticos/deterministas y somáticos/genéticos

La experiencia acumulada en los estudios acerca de los efectos biológicos de las radiaciones ha permitido formularlos principios de protección contra los efectos de las radiaciones ionizantes (protección radiológica) que garantizan un empleo seguro de las radiaciones ionizantes sin consecuencias para la salud tanto de aquellos trabajadores que directamente las emplean como la del público en general. Los principios de la protección radiológica son mundialmente aceptados y han sido recomendados por la Comisión

Internacional de Protección Radiológica. Se identifican 3 principios básicos que pueden resumirse de manera simplificada [179], como sigue:

• ***Justificación:*** La utilización de las radiaciones ionizantes en una determinada aplicación solo debería aceptarse si reporta a los individuos expuestos o a la sociedad un beneficio muy superior al riesgo que implica la utilización de las radiaciones.

Tal concepción es de amplia aceptación en otras esferas de la vida diaria; así por ejemplo, la utilización del transporte aéreo aún cuando tiene asociado un determinado nivel de riesgo, es aceptada por la gran mayoría de la sociedad ya que reporta innegables beneficios.

• ***Limitación de las dosis:*** A fin de garantizar que la salud de las personas no se vea afectada debido al empleo de las radiaciones ionizantes, las dosis derivadas de dicho empleo no podrán superar determinados valores internacionalmente aceptados. Tales valores diferencian trabajadores de público pues los primeros por razones obvias reciben comparativamente más dosis, sin embargo estos límites de dosis garantizan que dosis de radiación que reciben los trabajadores expuestos y el público sean 100 y 2000 veces menores, respectivamente, que las dosis que pueden causar daños a la salud.

• ***Optimización de la protección:*** Aún cuando se cumpla el criterio de limitación antes expuesto, la existencia del valor límite no puede interpretarse como que toda persona recibirá una dosis igual al límite.

En adición el principio de optimización exige que dichas dosis sean tan bajas como razonablemente sea posible alcanzar. Una buena práctica en la utilización de este principio durante el empleo de las radiaciones ionizantes demuestra que es posible un uso adecuado con dosis que no superan el 50 % del límite.

Anexos

Anexo 1- Propiedades importantes de algunas partículas elementales y compuestas.

Nombre	*Símbolo*	*Carga*	*Masa en reposo como múltiplo de m_u*[1]	*o m_e*[2]	*Energía en reposo en MeV*	*Período de desintegración $T_{1/2}$*	*Productos de desintegración*
Fotón[3]	γ	**0**	**0**	**0**	**0**	**estable**	**-**
Leptones:							
electrón	β^-	$-e$	**0,00055**	**1**	**0,511**	**estable**	**-**
positrón	β^+	$+e$	**0,00055**	**1**	**0,511**	**-**	**-**
neutrino	υ	**0**	$<10^{-6}$	$<10^{-3}$	$<10^{-3}$	**estable**	**-**
Mión μ	$\mu^\pm$	$\pm e$	**0,114**	**207**	**106**	$1{,}5.10^{-6}$ **s**	$\beta^\pm + 2\nu$
Mesones:							
Mesón π	$\pi^\pm$	$\pm e$	**0,150**	**273**	**139**	$1{,}7.10^{-8}$ **s**	$\mu^\pm + \nu$
Mesón π°	π^o	**0**	**0,145**	**264**	**135**	$\sim10^{-16}$ **s**	2γ
Mesón k	$k^\pm$	$\pm e$	**0,530**	**966**	**494**	$0{,}9.10^{-8}$ **s**	2π **o** 3π
Mesón k⁰	K^0	**0**	**0,534**	**974**	**493**	$0{,}9.10^{-10}$ **s**	2π
Núcleos e hiperones(=bariones):							
protón	**p**	$+e$	**1,0076**	**1836**	**938**	**estable**	**-**
neutrón	**n**	**0**	**1,0090**	**1839**	**940**	**13 min**	$p+\beta^- + \nu$
Partícula Λ	Λ[4]	**0**	**1,197**	**2182**	**1115**	$2{,}6.10^{-10}$ **s**	$P+\pi^-$
PartículaΣ	$\Sigma\pm$[5]	$\pm e$	**1,277**	**2327**	**1189**	$\sim10^{-10}$ **s**	$n+\pi^\pm$

Núclidos (= núcleos atómicos):								
deuterón	**d**	$^{+}$**e**	**2,0142**	**3670**	**1875**	**estable**	**-**
tritón	**t**	$^{+}$**e**	**3,0165**	**5497**	**2809**	**12 años**	$^{3}He+\beta^{-}+v$
Partícula α	α	$^{+}$**2e**	**4,0028**	**7294**	**3727**	**estable**	**-**

1) m_u *(constante de masa atómica) = 1.660 x10^{-27} kg*

2) m_e = *masa del electrón en reposo*

3) **fotón** = *cuanto de luz, de rayos x o gamma*

4) ***lambda***

5) ***sigma***

Leptones*: Constituyen la clase de partículas que no participan en la interacción fuerte, pero si en las electromagnéticas, débiles y gravitacionales. A las partículas elementales que forman parte de este grupo se les adjudican ciertas características denominada carga leptónica (no carga eléctrica). La carga leptónica del sistema de partículas es igual a la suma algebraica de las cargas leptónicas de las partículas que entran en este sistema. La carga leptónica caracteriza la interacción débil*

Mesones*: Son partículas inestables a las cuales les resulta inherente la interacción fuerte. Su nombre significa intermedio y se debe a que los mesones descubiertos inicialmente tenían una masa mayor que la del electrón (leptón) , pero menor que la del protón (barión); en la actualidad se conocen mesones cuyas masas son mayores que las de los protones.*

Bariones: *A esta clase pertenece el grupo de partículas elementales pesadas con una masa no menor que la del protón, en este caso el protón estable. Los bariones se caracterizan por poseer los cuatro tipos de interacciones. En cualquier reacción nuclear e interacciones de los bariones, su número total permanece invariable. Se conjetura que de la misma forma que la carga eléctrica es fuente de campo electromagnético, la carga barionica es fuente de campo de interacción fuerte.*

Las antipartículas de las partículas de las partículas elementales tienen los mismos valores de la masa y del espín que las partículas elementales fundamentales correspondientes , pero se diferencian de éstas por el signo de las magnitudes que determinan sus propiedades eléctricas y magnéticas . Durante la colisión de las partículas y de la antipartícula correspondiente a ésta, tiene lugar la aniquilación y, las partículas se transforman en radiación electromagnética: fotones o en otras partículas

Anexo 2- Tabla de isótopos con los núclidos radiactivos más importantes

Leyenda

Números de masa entre paréntesis ( ): *Isótopo natural más frecuente.*

→ : *Radioisótopos de uso frecuentes en la medicina nuclear.*

(Th): *Aplicaciones de preferencia en radioterapia.*

T ½ (período de semidesintegración): *a=años; d=días; h=horas.*

MeV: *Energía de los principales componentes.*

Γ_H: *Constante de rendimiento de dosis en $\mu Sv\ m^2\ h^{-1}\ GBq^{-1}$ (incluso radiación de destrucción en emisores de positrónes y radiación de rayos X con captura K y conversión interna)*

K: Irradiador K: *Una forma especial de la desintegración β^+ es la captura K, en la cual no se produce ningún positrón , sino que se captura en cambio un electrón, con la subsiguiente emisión de la serie K de la radiación X, característica del elemento descendiente.*

Elemento		*Números de masa*		*$T_{1/2}$*	*MeV*			*Γ_H*
		Isótopos Estables	*Radio Isótopos*		α	β	γ	
H	**hidrógeno**	(1),2	→ 3	12ª	-	0,02	-	-
He	**helio**	3,(4)						
Li	**litio**	6,(7)						
Be	**berilio**	(9)	7	53d	-	K	0,47	7,8
B	**boro**	10,(11)						
C	**carbono**	(12),13	→14	5730a	-	0,16	-	-
N	**nitrógeno**	(14),15						
O	**oxígeno**	(16),17,18						

F	**flúor**	(19)	18	1,8h	-	0,63	0,51	150
Ne	**neón**	(20),21,22						
Na	**sodio**	(23)	22	2,6a	-	0,54	1,27	320
			24	15h	-	1,39	2,76	490
Mg	**magnesio**	(24),25,26	28	21h	-	0,42	1,35	210
Al	**aluminio**	(27)						
Si	**silicio**	(28),29,30	31	2,6h	-	1,47	-	-
P	**fósforo**	(31)	→32	14d	-	1,71	-	-
S	**azufre**	(32),33,34,36	→35	88d	-	0,17	-	-
CI	**cloro**	(35),37						
A	**argón**	36,38,(40)	37	34d	-	K	-	-
			41	1,8h	-	1,20	1,29	180
K	**potasio**	(39),40,41	42	12h	-	3,58	1,51	37
Ca	**calcio**	(40),42,43,44,46,48	45	164d	-	0,25	-	-
			47	4,5d	-	0,66	1,29	150
Sc	**escandio**	(45)	46	84d	-	0,36	1,12	290
Ti	**titanio**	46,47,(48),49,50						
V	**vanadio**	50,(51)	48	16d	-	0,70	1,32	420
Cr	**cromo**	50,(52),53,54	→51	28d	-	K	0,32	4,8
Mn	**manganeso**	(55)	52	5,6d	-	0,58	1,46	500
			54	313d	-	K	0,84	130
			56	2,6h	-	2,81	0,84	230
Fe	**hierro**	54,(56),57,58	→59	45 d	-	0,46	1,10	170
Co	**cobalto**	(59)	56	77d	-	1,50	1,23	480
			57	272d	-	K	0,12	15
			→58	71d	-	0,47	0,81	150
			→60(Th)	5,3a	-	0,31	1,33	350
Ni	**níquel**	(58),60,61, 62,64	65	2,5h	-	2,10	1,12	75
Cu	**cobre**	(63),65	64	13h	-	0,57	0,51	29

Zn	**zinc**	(64),66,67,68,70	65	244d	-	K	1,12	83
Ga	**galio**	(69),71	66	9,4h	-	4,14	0.51	310
			67	33d		K	0,30	21
			68	1,1h		1,88	0,51	150
			72	14h		0,96	2,20	360
Ge	**germanio**	70,72,73,(74),76	71	11d	-	K	-	-
As	**arsénico**	(75)	74	18d	-	1,36	0,59	120
			76	1,1d	-	2,97	0,55	63
			77	1,6d	-	0,68	-	-
Se	**selenio**	74,76,77,78,(80),82	→75	120d	-	K	0,27	55
Br	**bromo**	(79),81	82	1,5d	-	0,44	0,77	390
Kr	**criptón**	78,80,82,83,(84),86	→85	11a	-	0,67	0,52	0,3
Rb	**rubidio**	(85),87	86	19d	-	1,80	1,08	14
Sr	**estroncio**	84,86,87,(88)	85	65d	-	K	0,51	79
			→87m	2,8h		-	0,39	49
			89	50d		1,46	-	-
			→90(Th)	28a		2,25	-	-
Y	**itrio**	(89)	88	107d	-	K	1.89	360
			90	2,7d		2,25	-	-
			91	59d		1,54	1,20	95
Zr	**zirconio**	(90),91,92,94,96	95	64d	-	0,39	0,75	110
Nb	**niobio**	(93)	95	35d	-	0,16	0,76	120
Mo	**molibdeno**	92,94,95,96,97,(98), 100	99	2,7d	-	1,23	0,14	39
Tc	**tecnecio**	-	99	210000 a	-	0,29	-	-
			→99m	6,0h		-	0,14	16
Ru	**rutenio**	96,98,99,100,101,(1 02)104	103	39d	-	0,21	0,49	77
Rh	**rodio**	(103)	105	1,5d	-	0,56	0,30	12
Pd	**paladio**	102,104,105,(106),1	109	13h	-	1,02	0,09	15

		08,110						
Ag	**plata**	(107),109	110m	250d	-	0,53	0,88	410
			111	7,5d	-	1,04	0,34	4
Cd	**cadmio**	106,108,110,111,11	115m	45d	-	1,61	0,94	5
		2,						
		113,(114),116						
In	**indio**	113,(115)	→113m	1,7h	-	-	0,39	48
			114m	50d	-	1,98	0,19	26
Sn	**estaño**	112,114,115,116,11	113	115d	-	K	0,39	74
		7,						
		118,119,(120),122,1						
		24						
Sb	**antimonio**	(121),123	122	2,7d	-	1,40	0,75	69
			124	60d	-	2,31	1,71	260
			125	2,8a	-	0,30	0,60	78
Te	**telurio**	120,122,123,124,12	132	3,2	-	2,12	0,96	390
		5,						
		126,128,(130)						
I	**yodo**	(127)	→123	13h	-	K	0,16	43
			→125	59d	-	K	0,03	39
			→131	8d	-	0,61	0,36	59
			132	2,3h	-	2,12	0,67	340
Xe	**xenón**	124,126,128,129,13	→133	5,2d	-	0,34	0,08	14
		0,						
		131,(132),134,136						
Cs	**cesio**	(133)	134	2,1a	-	0,65	0,80	240
			→137(Th)	30a	-	0,52	0,66	88
Ba	**bario**	130,132,134,135,13	131	12d	-	K	0,50	85
		6,	133	10,5a	-	K	0,30	80
		137,(138)	140	13d	-	1,02	0,54	31
La	**lantano**	138,(139)	140	1,7d	-	1,38	1,60	320

Ce	**cerio**	136,138(140),142	141	33d	-	0,44	0,14	12
			144	284d	-	2,97	2,18	7
Pr	**praseodimio**	(141)	143	14d	-	0,93	-	-
Nd	**neodimio**	(142),143,144,145, 146,148,150	147	11d	-	0,83	0,53	24
Pm	**prometio**	-	147	2,6a	-	0,22	-	-
Sm	**samario**	144,147,148149,15 0, (152),154						
Eu	**europio**	151,(153)	152	13,5a	-	0,71	0,34	170
			154	8,6a	-	0,83	1,28	180
			155	4,8a	-	0,16	0,13	9
Gd	**gadolinio**	152,154,155,156,15 7, (158),160						
Tb	**terbio**	(159)						
Dy	**disprosio**	156,158,160,161,16 2, 163,(164)						
Ho	**holmio**	(165)						
Er	**erbio**	162,164,(166),167, 168,170						
Tm	**tulio**	(169)	170	129d	-	0,97	0,08	0,8
Yb	**iterbio**	168,170,171,172,17 3 (174),176	175	4,2d	-	0,47	0,40	6
Lu	**lutecio**	(175),176	177	6,7d	-	0,50	0,21	7
Hf	**hafnio**	174,176,177,178,17	175	70d	-	K	0,34	56
		9,	181	42d	-	0,41	0.61	84

		(180)						
Ta	**tántalo**	(181)	182	114d	-	0,44	1,22	190
W	**tungsteno**	180,182,183,(184),186	185	75d	-	0,43	-	-
			187	1d	-	1,31	0,69	73
Re	**renio**	185,(187)	186	3,8d	-	1,07	0,14	3
Os	**osmio**	184,186,187,188,189,(192)	191	15d	-	0,14	0,13	13
Ir	**iridio**	191,(193)	192	74d	-	0,67	0,32	120
Pt	**platino**	190,192,194,(195),196, 198	197	18h	-	0,67	0,08	3
Au	**oro**	(197)	→198	2,7d	-	0,96	0,41	63
			199	3,1d	-	0,30	0,16	12
Hg	**mercurio**	196,198,199200,201, (202),204	→197	2,7d	-	K	0,08	9
			203	47d	-	0,21	0,28	35
TI	**talio**	203,(205)	204	3,8a	-	0,77	-	-
Pb	**plomo**	204,206,207,(208)	210	22a	-	0,01	0,05	0,5
Bi	**bismuto**	(209)	206	6,3d	-	K	0,80	-
			210	5d	-	116	-	-
Po	**polonio**	-	208	2,9a	5,15	-	-	-
			210	138d	5,31	-	-	-
Rn	**radón**	-	222	3,8d	5,49	-	-	-
Ra	**radio**	-	223	11,4d	5,72	-	-	-
			224	3,7d	5,68	-	0,24	1,4
			→226(Th)	1600a	4,78	-	0,19	0,9
			228	5,75a	-	0,04	-	-
Ac	**actinio**	-	227	22a	4,95	0,01	-	-
Th	**torio**	(232)	227	19d	6,05	-	-	-
			228	1,9a	5,42	-	0,09	0,2
			230	75400a	4,68	-	0,14	0,05

			234	24d		2,32	0,10	2
Pa	**protactinio**	(231)	233	27d	-	0,26	0,31	-
U	**uranio**	235,(238)	233	160000a	4,82	-	-	-
			234	244500a	4,78	-	0,05	0,02

Anexo 3- Constantes físicas

Magnitud y símbolo		*Valor Numérico*	*Unidad*
Velocidad de la luz en el vacío	**c**	$2{,}9979246.10^{8}$	ms^{-1}
Cuanto de acción de Planck	**h**	$6{,}626176.10^{-34}$	Js
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	$5{,}67032.10^{-8}$	$Wm^{-2}K^{-4}$
Masa del Protón en reposo.	m_p	$1{,}6726485.10^{-27}$	kg
Masa del neutrón en reposo	m_n	$1{,}6749543.10^{-27}$	kg
Masa del electrón en reposo	m_e	$9{,}109534.10^{-31}$	kg
Carga elemental	**e**	$1{,}6021892.10^{-19}$	C
Carga específica del electrón	**e/m**	$1{,}7588047.10^{-11}$	$C\ kg^{-1}$
Radio electrónico	$r_e = a\lambda c/2\pi$	$2{,}8179380.10^{-15}$	m
Radio según Bohr	$r_o = \lambda c/2\pi\ a$	$5{,}2917706.10^{-11}$	m
Longitud de onda del electrón según Compton	$\lambda c = h / m_e c$	$2{,}4263089.10^{-12}$	m
Momento magnético del electrón	$\mu\ e$	$9{,}284832.10^{-24}$	JT^{-1}
Magnetón de Bohr	$\mu\ B$	$9{,}274078.10^{-24}$	JT^{-1}
Nucleomagnetón	$\mu\ N$	$5{,}050824.10^{-27}$	JT^{-1}
Constante de Rydberg	R_∞	$1{,}097373177.10^{7}$	m^{-1}
Constante de Boltzmann	**K**	$1{,}380662.10^{-23}$	JK^{-1}
Constante de Avogadro	N_A	$6{,}022045.10^{23}$	mol^{-1}
Volumen molar normal	V_m	$2{,}241383.10^{-2}$	$m^3\ mol^{-1}$
Constante de Faraday	$F = N_{Ae}$	$9{,}648456.10^{4}$	$C\ mol^{-1}$

Punto Triple del agua	T_0	273,16	K
Constante de gravitación	**f**	$6,6720.10^{-11}$	$N\ m^2\ kg^{-2}$
Equivalente de energía de la masa de 1 kg	mc^2	$8,98755.10^{-16}$	J
Equivalente de energía de la masa electrónica	m_ec^2	$5,1101.10^5$	eV
Equivalente de energía de 1 eV por molécula		$9,6487.10^4$	$J\ mol^{-1}$
Constante de Influencia	ε_0	$8,85418782.10^{-12}$	$A_S\ V^{-1}\ m^{-1}$
Constante de inducción	μ_0	$1,25663706.10^{-6}$	$V\ s\ A^{-1}\ m^{-1}$
Resistencia de las ondas en el vacío	$Z=\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	$3,767.10^2$	Ω

Anexo 4- Sistema Internacional de Unidades

Magnitudes físicas

Magnitud es todo lo que se puede medir. Medir significa *comparar* utilizando algún *instrumento.* Una magnitud siempre puede expresarse como una fracción o múltiplo de otra de la misma clase. Ej., longitud, tiempo, velocidad, energía. No son magnitudes el amor, el odio, la belleza, la envidia o los celos. Cuando se efectúa una medición, el valor de la magnitud medida se compara con el de otra magnitud que se designa arbitrariamente, denominada magnitud *patrón*. Así,

$$L = 3.12 \pm 0.01 \text{ m}$$

significa que al medir L comparándola con el patrón (metro) se encontró que era 3.12 veces mayor, y que el proceso estuvo afectado de una imprecisión ó *error de medición* de 1 cm (0.01 m). Este valor se denomina *error absoluto* de la medición, y se designa usualmente por δL: (δL = 0.01 m). El valor real de la medición puede ser cualquiera comprendido entre 3.11 y 3.13 m.

El error absoluto de una medición da una medida de cuan "buena" es la medición. Por ejemplo,

$$L = 3.125 \pm 0.001 \text{ m}$$

indica una medición mucho más *precisa* (se utilizaron mejores instrumentos, se tuvo mayor cuidado, etc.). Si al medir una longitud cualquiera A se obtiene un error δA, entonces:

$$L = A \pm \delta A\ .$$

El *error relativo* se define como

$$\varepsilon = \delta A\ /\ A$$

mientras que el *error porcentual* es igual al producto del error relativo por 100:

$$\varepsilon_{\%} = \varepsilon \times 100$$

Magnitudes fundamentales y derivadas

Las magnitudes derivadas son aquellas que se pueden definir a partir de otras ya conocidas, Por ejemplo

$$[a] = [v]/[t] \qquad ; \qquad [v] = [L]/[t]$$

Las magnitudes que no pueden definirse mediante ecuaciones, a partir de otras magnitudes, se llaman *magnitudes fundamentales*. Se definen sobre la base del llamado *criterio operacional,* que considera una magnitud totalmente definida cuando se especifican los pasos necesarios para *medir* su valor.

Así, la longitud de un cuerpo a lo largo de una dirección determinada es aquella propiedad del mismo que se mide colocando una regla dividida en partes iguales a lo largo de esa dirección, haciendo coincidir el cero de la regla con el extremo del cuerpo y anotando el número de divisiones que comprende la regla hasta el otro extremo, etc. La longitud de la regla utilizada es la *magnitud patrón*, y la regla como tal es el patrón. Para evitar que haya tantos patrones como reglas hay, es necesario tomar una de ellas como patrón fundamental, y referir todas las demás longitudes a este patrón.

Durante mucho tiempo se utilizó el *metro patrón*, que se encuentra desde 1799 en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas en Sevres, cerca de París, como patrón internacional de longitud. Se consideraba al metro como la longitud comprendida entre dos marcas hechas en los extremos de una barra de platino-iridio que se encontraba en dicho laboratorio.

Desde hace más de 200 años han existido una serie de convenios internacionales para definir las restantes magnitudes patrones. También en 1799 se introdujeron los patrones de masa (kilogramo patrón, aun vigente) y de tiempo. Hasta 1955, el patrón científico del tiempo, el segundo, se basaba en el periodo de rotación terrestre, y se definía como 1/86.400 del día solar medio. Cuando se comprobó que la velocidad de rotación de la Tierra, además de ser irregular, estaba decreciendo gradualmente, se hizo necesario redefinir el segundo. En 1955, la Unión Astronómica Internacional definió el segundo como 1/31.556.925,9747 del año solar en curso el 31 de diciembre de 1899. El Comité Internacional de Pesas y Medidas adoptó esa definición al año siguiente. Con la introducción de los relojes atómicos —en particular, con la construcción de un reloj atómico de haz de cesio de alta precisión, en 1955— se hizo posible una medida más precisa del tiempo. El reloj atómico mencionado utiliza la frecuencia de una línea espectral producida por el átomo de cesio 133.

Sistema Internacional de Unidades

En la práctica se ha encontrado que sólo son necesarias 7 magnitudes fundamentales para definir todas las demás magnitudes, de cualquier disciplina. En el Sistema Internacional (SI) de unidades, vigente oficialmente en nuestro país y en la mayoría de los países, las magnitudes fundamentales aparecen en la tabla siguiente (aunque muchas veces otras viejas magnitudes se conserven en la práctica).

Magnitud	Patrón	Símbolo
longitud	**metro**	m
masa	**kilogramo**	kg
tiempo	**segundo**	s
temperatura	**kelvin**	K
intensidad de la corriente	**ampere**	A
intensidad de la luz	**bujía ó candela**	b ó cd
cantidad de sustancia	**mol**	mol

Algunas viejas unidades se han redefinido sobre la base de las unidades del SI. Así, por ejemplo:

1 libra-masa = 0.4535934277 kg

1 yarda = 0.9144 m

1 litro = 0.001 m^3

Precisión y exactitud

Los conceptos de precisión y exactitud muchas veces se confunden en la literatura. Entenderemos que una medición es *precisa* cuando la misma es reproducible dentro de un conjunto de valores pequeños. Las mediciones precisas se asocian a los instrumentos de alta sensibilidad, capaces de hacer determinaciones con un número relativamente grande de cifras significativas después del punto decimal.

La *exactitud* viene dada por la veracidad de la medición cuando se compara con los valores del correspondiente patrón. Una medición puede ser muy precisa, pero si el instrumento no estaba calibrado correctamente con relación al patrón, la medición será poco exacta. Por

ejemplo, si no se verifica que una balanza marca cero cuando el plato está vacío, cualquier pesada posterior tendrá como error la diferencia que marcaba el instrumento con relación al cero.

Múltiplos y submúltiplos de las magnitudes fundamentales

En la tabla siguiente aparecen los múltiplos más comunes de las magnitudes fundamentales, también utilizados para indicar múltiplos de otras magnitudes.

Nombre	***Símbolo***	*Significado*
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
deca	da	10
	metro, gramo, segundo, litro	
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
micro	µ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}

En vez de *megagramo* se utiliza la tonelada: $1\ t = 10^3\ kg = 10^6\ g$. El litro es igual al dm^3.

Para transformar un valor de una unidad a otra, basta sólo con sustituir el significado del prefijo. Por ejemplo, para transformar 3 dm en metros:

$$3\ dm = 3 \times (10^{-1} m) = 0.3\ m$$

Para transformar 500 g en toneladas:

$$500\ g = 5 \times 10^{2}\ g = 5 \times (10^{6} / 10^{4})\ g = 5 / 10^{4}\ ton = 5 \times 10^{-4}\ ton$$

Anexo 5- Magnitudes y unidades radiológicas

Magnitud	Definición	Unidad	
		Sistema Internacional	Otros
Actividad	Número de desintegraciones por unidad de tiempo	1 Becquerelio=1 Bq=1 d.p.s.(desintegración por segundo	1 Crio=1 Ci= 3.7 10^{10} Bq
Exposición	Carga total de iones liberada por unidad de masa de aire (válido en aire seco)	1 Culombio/kilogramo = 1 C/kg	1 Roentgen = 1 R = 2.58 10^{-4} C/kg
Tasa de exposición	Exposición por unidad de tiempo	1 C/kg s	1 R/s, 1 R/h
Dosis absorbida	Energía depositada por unidad de masa de material (Análoga a la exposición pero para materiales)	1 Gray = 1 Gy = 1 J/kg	1 rad = 100 ergios/gramo 1Gy = 100 rad
Tasa de dosis absorbida	Dosis absorbida por unidad de tiempo	1 Gy/s	rad/h, rad/min
Dosis equivalente	La dosis absorbida produce efectos distintos según el tipo de radiación, por eso se define la dosis equivalente que es independiente de la radiación que la haya producido.	1 Sievert = 1 Sv	1 rem , 1Sv = 100 rem
Dosis efectiva	Suma ponderada de las dosis equivalentes en los distintos órganos	1 Sievert = 1 Sv	1 rem 1 Sv = 100 rem

Bibliografía

1. Hart IR, Harden RM.(2000) Best evidence medical education (BEME): a plan for action. .Journal Medical Teacher; (22): 131- 5.
2. Coriat B.(1996) El taller y el robot. Editorial Siglo XXI.México
3. Gil PD, Valdés CP.(1996) Tendencias actuales en la enseñanza aprendizaje de la Física. En: Temas escogidos de la didáctica de la Física. Editorial Pueblo y Educación. La Habana
4. Vygotski LS.(1999) El problema de la conciencia. Obras Escogidas, Colección Aprendizaje.Editorial Visor LXXIV. Madrid
5. Bernaza G, Douglas C, Valle M.(2000) Orientar para un aprendizaje significativo. Revista Avanzada. (5). Universidad de Medellín
6. Bernaza, G, Douglas C.(2001) El planteamiento y resolución de problemas como una vía para el diagnóstico de la Zona de Desarrollo Próximo del estudiante. Revista Avanzada (3). Universidad de Medellín
7. Carrascosa J, Furio C, Valdes P.(1996) Las concepciones alternativas de los estudiantes y sus implicaciones didácticas. En: Temas escogidos de la didáctica de la Física. Editorial Pueblo y Educación. La Habana
8. Stokes G. (2009) Climate and Society: a multi-level challenge for science literacy. In Sáez, M.J. (Ed) La cultura científica en la escuela. Universidad de Valladolid 2009 (in print).Valladolid
9. De la Herran A, Hashimoto E, Machado E.(2005) Investigar en Educación: Fundamentos, aplicación y nuevas perspectivas. Editorial DILEX. Madrid
10. Behar DS. (2004) Reseña Histórica de la interacción de la física y las ciencias médicas. Problemática actual en sus vínculos y estructuración académica.2004 Infomed. URL: http/www.scu.sld.cu/turquimed/index.htm

11. Burns DH, Mac Donald SG. (1979) Physics for biology and premedical students. 2 ed. ELBS,Londres
12. Behar D, Méndez L.(1998) Aspectos didácticos de la Física dentro de la oncología I. MEDISAN [revista electrónica] ;2(1):Disponible en: http://www.sld.cu/revistas/
13. Koroliuk I, Tzib A.(1988) Relatos sobre medicina nuclear. Editorial Joven Guardia. Moscú
14. Castellanos, M.E.(2006) Las nuevas tecnologías: necesidades y retos en radioterapia en América Latina, Revista Panamericana Salud Pública, La Habana 20(3)143–150,
15. Wikipedia (2008) La enciclopedia libre. Premios Nóbel en Fisiología y Medicina. Disponible en http://es.wikipedia.org/, última consulta 10 de octubre 2008.
16. Bueche F.J, Hecht E.(2000) Física General. Edit. McGRAW-HILL.9na. Edición. México
17. Colectivo de autores.(2007) Morfofisiología II. Edit. Ciencias Médicas.La Habana
18. Gowitzke B., Milner M.(2001) El cuerpo y sus movimientos - Bases científica. Edit. Paidotribo.Barcelona
19. DeCoster TA.(1991) Biomechanical Principles Related to the Musculoskeletal System. En: A Basic Science Primer in Orthopaedics. Bronner F and Worrell, eds. Edit. Williams &Wilkins, Baltimore
20. Marion JB.(1978) General Physics with Bioscience Essays, John Wiley & Son Inc. USA
21. Gowitzke B., Milner M. (2001) El cuerpo y sus movimientos - Bases científicas. Editorial Paidotribo. México
22. Cameron J R., Skofronick JG.(1978) Medical Physics. Ed. John Wiley & Son, USA
23. Colectivo de autores. (2007) Morfofisiología II. Edit. Ciencias Médicas.La Habana
24. DeCoster TA. (1991) Biomechanical Principles Related to the Musculoskeletal System. En: A Basic Science Primer in Orthopaedics. Bronner F and Worrell, eds. Edit. Williams &Wilkins, Baltimore

25. Hislop H., Montgomery J. (2001) Pruebas Funcionales Musculares. Edit. Marban. Madrid.
26. Oborne D J. (1992) Ergonomía en Acción: La adaptación del medio de trabajo al hombre. Editorial Trillas, 1ra ed. México
27. Luttgens K, Hamilton N. (1997) Kinesiology: Scientific Basis of Human Motion. WI, Brown & Benchmark Publishers. 9na. ed. Madison
28. Ahonen J, Lahtinen T, Sandström M, Giuliano P, Wirhed R. (1996) Kinesiología y Anatomía Aplicada a la Actividad Física. Edit. Paidotribo. Barcelona
29. Hamill J, Knutzen, KM. (1995) Biomechanical Basis of Human Movement. Edit. Williams & Wilkins. Baltimore
30. Thompson CW, Floyd, RT. (1996) Manual de Kinesiología Estructural.Edit. Paidotribo.Barcelona
31. Thompson CW, Floyd, RT. (1996) Manual de Kinesiología Estructural.Edit. Paidotribo.Barcelona
32. Gowitzke B, Milner M. (2001) El cuerpo y sus movimientos - Bases científicas.Edit. Paidotribo.Barcelona
33. Hall SJ.(1999) Basic Biomechanics . Edit. McGraw-Hill, 3ra. ed.,Boston
34. Hamill J, Knutzen, KM. (1995) Biomechanical Basis of Human Movement, Edit. Williams & Wilkins. Baltimore.
35. Streeter VL. (1990) Mecánica de los fluidos. Ediciones del Castillo, Madrid:
36. Fernéndez LB. (1999.) Introduccion a la mecanica de fluidos. Edit Alfa omega Grupo. 2da. Edición. México.
37. Vernard J.K, Street R.L. (1998) Elementos de mecánica de fluidos. Edit. CECSA. Tercera Edición Versión 51. España

38. Fay A J. Mecánica de fluidos. México. Edit. CECSA Cuarta Edición.1995
39. Wilson DJ (1994)La mecánica de fluidos, aplicaciones e implicaciones. Edit. Prentice Hall. Segunda Edición . Chile.
40. Muller J. (1993) La mecánica de fluidos. Edit. CECSA, 3ra. ed. México.
41. Frumento A.(1995) Biofísica. Ed. Mosby/Doyma Libros. Madrid
42. Rouvière H, Delmas A. (1996) Anatomía Humana. Edit. Masson, 9ª ed., 3 vols. Barcelona.
43. Ganong, W F. (1996.) Manual de Fisiología Médica. Edit. El Manual Moderno, 15ª ed., México
44. Cromer,A.H. (1983) Física para la Ciencias de la Vida. Editorial Reverté, 2º ed. Barcelona
45. Parisi M. (2001) Temas de Biofísica, Edit.. McGraw Hill, Chile.
46. Skofronick H (1978) Medical Physics. Edit.. John Wiley and Sons Edit.. New York.
47. Parisi, M. (2001) Temas de Biofísica, Edit.. McGraw Hill, Chile.
48. Frumento A.(1995) Biofísica. Ed. Mosby/Doyma Libros. Madrid,
49. Cromer,A.H. (1983) Física para la Ciencias de la Vida. Editorial Reverté, 2º ed. Barcelona
50. Skofronick H (1978) Medical Physics. Edit.. John Wiley and Sons Edit.. New York.
51. Mauldin J H. (1991) Luz, láser y óptica. Edit. McGraw-Hill - Interamericana de España, Madrid:
52. Hecht E. (2000) Óptica. Edit. Addison Wesley Iberoamericana, 3ª edición. Buenos Aires.
53. Hecht E. (2000) Óptica. Edit. Addison Wesley Iberoamericana, 3ª edición. Buenos Aires.
54. Tipler PA, Mosca G. (2005) Física. Ed. Reverté, 5ª ed., vol. 2. Barcelona.

55. Serway R A, Jewett W. (2003) Física. Edit. Thomson-. Paraninfo, 3ª edición, vol 2. Madrid.
56. Tipler P. (1995) Física. Edit. Reverté, 3ª ed., Barcelona.
57. Hecht E. Óptica. Buenos Aires. Edit. Addison Wesley Iberoamericana, 3ª edición. 2000
58. Tipler P. (1995) Física. Edit. Reverté, 3ª ed., Barcelona.
59. Rouviere H, (1996.) Delmas A. Anatomía Humana. Edit. Masson, 9ª ed., 3 vols. Barcelona.
60. Greenstein B. (2000) Color Atlas of Neuroscience, Neuroanatomy and Neurophysiology. Edit. Thieme Stuttgart · New York
61. Cromer AH. (1994.) Física para las ciencias de la vida. Editorial Reverté. Barcelona.
62. Velasco P. (2000) Física aplicada a las ciencias de la salud. Edit Masson. 1ª ed. Barcelona.
63. Alonso M., Finn E. (1986) Campos y Ondas. En Física. Vol. II. Edit. Addison Wesley Iberoamericana, México
64. Fidalgo, J.A. (1995) Física General. Editorial Reverté, Barcelona:
65. Tipler P. (1995) Física. Edit. Reverté, 3ª ed., Barcelona:
66. Fidalgo, J.A. (1995) Física General. Editorial Reverté, Barcelona:
67. Alonso M., Finn E. (1986) Campos y Ondas. En Física. Vol. II. Edit. Addison Wesley Iberoamericana, México
68. Tipler P. (1995) Física. Editorial Reverté, 3ª ed., Barcelona:
69. Ganong W F. (1996) Manual de Fisiología Médica. Editorial El Manual Moderno, 15ª ed., México
70. Becker W.(1992.) Otorrinolaringología. Editorial Doyma, 2ª ed., Madrid
71. Paris M. (2001) Temas de Biofísica, Edit. McGraw Hill, Santiago de Chile,

72. Cromer A.H. (1983) Física para la Ciencias de la Vida. Editorial Reverté, 2º ed. Barcelona
73. Cromer A.H. (1983) Física para la Ciencias de la Vida. Editorial Reverté, 2º ed. Barcelona
74. Bender G. (1960.) Laennec y el estetoscopio. Edit. Parke, Davis & Company, Buenos Aires.
75. Pedraza V M. (2000) Física aplicada a las ciencias de la salud. Edit. Masson, 1ra ed. Barcelona.
76. Taylor K, Burns P, Wells, P. (1995) Clinical aplications of doppler ultrasound. Edit. Raven Press, Second ed. New York
77. Kadomtsev B. (1984.) Ondas en nuestro alrededor. Editorial Mir, Moscú:
78. Maglione S. (2001) Segredos em diagnóstico físico. Edit. Artmed; Porto Alegre
79. Bega G, Lev-Toaff AS, O'Kane P, Becker E, Kurtz AB. (2003) Three-dimensional ultrasonography in gynecology: technical aspects and clinical applications. Journal Ultrasound Med;22: 1249-69.
80. Baldor A. (1985) Álgebra. .Edit. CODICE, S.A. Madrid
81. Alcazár A.,Cárdenas F. (1989) Descubrir la electricidad. Edit. Alhambra Longman, S.A., Madrid.
82. Priestle, J. (1775) The History and Present State of Electricity, with original experiments. Edit. printed for J. Dodsley, J. Johnson and T. Cadell, Third edition, London
83. Purcell EM. (1988) Electricidad y magnetismo. Edit. Reverté, 2ª ed., Barcelona
84. Nersessian NJ. (1984) Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories. Edit Kluwer Academic Publishers, Londres
85. Serway R A. (1994) Física. Edit. McGraw-Hill - Interamericana de México, México

86. Gil DJ. (1988) Electricidad y magnetismo. Edit. Santillana, 3ª ed., Madrid
87. Purcell EM. (1988) Electricidad y magnetismo. Edit. Reverté, 2ª ed., Barcelona
88. Greene N R. (2005) Energy flow for a variable-gap capacitor. The Physics Teacher, Vol 43, September. USA. pp. 340-343
89. Gil DJ. (1988) Electricidad y magnetismo. Edit. Santillana, 3ª ed., Madrid
90. Purcell EM. (1988) Electricidad y magnetismo. Edit. Reverté, 2ª ed., Barcelona
91. Lévy E. (1992) Diccionario de Física. Ediciones Akal, Madrid
92. Gil DJ. (1988) Electricidad y magnetismo. Edit. Santillana, 3ª ed., Madrid
93. Lévy E. (1992) Diccionario de Física. Ediciones Akal, Madrid
94. Cromer A.H. (1983) .Física para la Ciencias de la Vida. Edit. Reverté, 2º ed. Barcelona
95. Cromer A.H. (1983) .Física para la Ciencias de la Vida. Edit. Reverté, 2º ed. Barcelona
96. Snell RS. (2003) Neuroanatomía Clínica, Edit. Panamericana. 5ª Edit. Buenos Aires.
97. Rubin M, Safdieh J.E. (2008) Netter – Neuroanatomía Esencial. Edit. Elsevier Masson. Barcelona.
98. Gazzaniga, M.S, Ivry R.B, Mangun G.R.(2002) Cognitive Neuroscience. Edit. W.W.Norton & Co. 2nd Ed. New York
99. Kandel E.R., Schwartz, JH., Jessel TM. (2001) Principios de Neurociencia Edit. McGraw – Hill Interamericana. Madrid.
100. Cromer A.H. (1983) Física para la Ciencias de la Vida. Edit. Reverté, 2º ed. Barcelona
101. Frumento A. (1995) Biofísica. Edit. Mosby/Doyma. Madrid
102. Matteucci C.Sur le courant électrique où propre de la grenouille. Second memoire sur l'électricité animale, faisant suite à celui sur la torpille. Ann. Chim. Phys. (2ème serie), 67, 1838 : 93-106.

103. Du Bois-Reymond EH Vorläufiger Abriss einer Untersuchung ueber den sogenannten Froschstrom und ueber die elektromotorischen Fische. Ann. Physik und Chemie, 1843: 58: 1-30.
104. Caton R. (1875) The electric currents of the brain. Br. Med. Journal: 2: 278.
105. Beck CS, Pritchard WH, Feil HS. (1947) Ventricular fibrillation of long duration abolished by electric shock. JAMA, Journal Am. Med. Assoc. 135: 985.
106. Berger H Über das Elektroenkephalogram des Menschen. Arch. f. Psychiat. 87, 1929: 527-70.
107. Abbott M M, Vanness H C. (1991) Termodinámica. Edit. McGraw-Hill, 2da. ed. México
108. García CL. (1986) Introducción a la termostática clásica, Editorial Trillas,3a Ed., México
109. Giancoli D. (1994) Física. Edit. Prentice Hall, 3 ª ed., México,
110. Abbott M M, Vanness H C. (1991) Termodinámica. Edit. McGraw-Hill, 2da. ed. México
111. Resnik H K. (2002) Física, Vol. 1. Edit. CECSA. Madrid
112. García CL. (1986) Introducción a la termostática clásica, Editorial Trillas,3a Ed., México
113. Abbott M M, Vanness H C. (1991) Termodinámica. Edit. McGraw-Hill, 2da. ed. México
114. García CL. (1986) Introducción a la termostática clásica, Editorial Trillas,3a Ed., México
115. Phillip A, Gray MA. El segunda de La Ley del la Termodinámica y el creacionismo. <http://130.205.83.211/la_segunda_ley_de_la_termodinami.htm [Consulta: 20 de noviembre del 2008]
116. Abbott M M, Vanness H C. (1991) Termodinámica. Edit. McGraw-Hill, 2da. ed. México
117. Resnik H K. (2002) Física, Vol. 1. Edit. CECSA. Madrid

118. García CL. (1983) Procesos irreversibles, en La física contemporánea, colección Las ciencias en el siglo XX, UNAM, México

119. Sheperd G. (1999) Neurobiology. Oxford University Press. New York

120. Cooper G M. (2004) La Celula, Edit. Marban, 2 ed., Madrid

121. Phillip A, Gray MA. El segunda de La Ley del la Termodinámica y el creacionismo. <http://130.205.83.211/la_segunda_ley_de_la_termodinami.htm [Consulta: 20 de noviembre del 2008]

122. Schneider ED., Sagan D. (2008) La termodinámica de la vida. edit. Tusquets. Barcelona

123. Wyatt MB, Mcsween HY. (2002) Spectral evidence for weathered basalt as an alternative to andesite in the northern lowlands of Mars. Nature Journal. 417, 263 – 266.

124. González A.A, (2006) ¿Qué es la energía?, Revista Unión Iberoamericana Soc. de Física Vol. 1 y 2, La Habana

125. Thellier M., Ripoll C. (1992) Bases Thermodynamiques de la Biologie Cellulaire. Edit. Masson. Paris

126. Goldberger AL. Amaral LA. Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging, [en línea] http://reylab.bidmc.harvard.edu/heartsongs/pnas-2002-99-2466.pdf, [Consulta: 15 de diciembre del 2008]

127. Cooper G M. (2004) La Celula, Edit. Marban, 2 ed., Madrid

128. Schneider ED., Sagan D. (2008) La termodinámica de la vida. edit. Tusquets. Barcelona

129. Schneider ED., Sagan D. (20008) La termodinámica de la vida. edit. Tusquets. Barcelona

130. Pérez S J, Villar GJ, Aguilar A. (2001) Crioterapia en atención primaria. Edit. MSD; Madrid.
131. Buckley D. (2000) Cryosurgery treatment of plantar warts. Med Journal ; 93:140-3.
132. B. H. Brown, R. H. Smallwood, DC Barber, PV Lawford**.** (1999) Medical Physics and Biomedical Engineering. Institute of Physic Publishing. Londres
133. Frumento A. (1995) Biofísica. 3ra Edición.Mosby/Doyma Libros. Madrid .
134. B. H. Brown, R. H. Smallwood, DC Barber, PV Lawford**.** (1999) Medical Physics and Biomedical Engineering. Institute of Physic Publishing. Londres
135. Bueche F.J, Hecht E. (2000) Física General. Edit. McGRAW-HILL.9na. Edición. México
136. Tipler PA, Mosca G. (2005) Física. Ed. Reverté, 5ª ed., vol. 2. Barcelona
137. Behar DS. (1997) Física médica en radioterapia. Edit. Oriente. Santiago de Cuba
138. Tipler PA, Mosca G. (2005) Física. Ed. Reverté, 5ª ed., vol. 2. Barcelona
139. Dendy PP, Heaton B. (1999) Physics for Diagnostic Radiology. Institute of Physic Publishing. Londres
140. Dendy PP, Heaton B. (1999) Physics for Diagnostic Radiology. Institute of Physic Publishing. Londres
141. Tipler PA, Mosca G. (2005) Física. Ed. Reverté, 5ª ed., vol. 2. Barcelona
142. Behar DS. (1997) Física médica en radioterapia. Edit. Oriente. Santiago de Cuba
143. Serway RA, Jewett W. (2003) Física. Edit. Thomson-. Paraninfo, 3ª edición, vol 2. Madrid
144. Serway RA, Jewett W. (2003) Física. Edit. Thomson-. Paraninfo, 3ª edición, vol 2. Madrid

145. Brown BH, Smallwood RH, Barber DC, Lawford PV. (1999) Medical Physics and Biomedical Engineering. Institute of Physic Publishing. Londre

146. Tipler PA, Mosca G. (2005) Física. Ed. Reverté, 5ª ed., vol. 2. Barcelona

147. Dendy PP, Heaton B. (1999) Physics for Diagnostic Radiology. Institute of Physic Publishing. Londres

148. Dendy PP, Heaton B. (1999) Physics for Diagnostic Radiology. Institute of Physic Publishing. Londres

149. Tipler PA, Mosca G. (2005) Física. Ed. Reverté, 5ª ed., vol. 2. Barcelona

150. Behar DS. (1997) Física médica en radioterapia. Edit. Oriente. Santiago de Cuba

151. Linton O, Marasco J. (1995) Radiología: un siglo de progresos. Rev Salud Mundial.:3(2)

152. Palmer P, Holm T. (1995) Fundamentos del diagnóstico por imagen. Rev Salud Mundial :1(3)

153. Dendy PP, Heaton B. (1999) Physics for Diagnostic Radiology. Institute of Physic Publishing. Londres

154. Palmer P, Holm T. (1995) Fundamentos del diagnóstico por imagen. Rev Salud Mundial 1(3)

155. Friedman BR, Jones JP, Chaves M G. (1990) Principles of MRI. Edit. McGraw-Hill; New York

156. Czernyc GW, Imhof H. (2006) Computed tomography and magnetic resonante tomography of the normal temporal bone. Radiologe J.:4(2)

157. Amaro E, Barker GJ. (2005) Study design in fMRI: basic principles. Radiologe Journal: 3(1)

158. Dendy PP, Heaton B. (1999) Physics for Diagnostic Radiology. Institute of Physic Publishing. Londres
159. Czernyc GW, Imhof H. (2003) Computed tomography and magnetic resonante tomography of the normal temporal bone. Radiologe Journal: 8(1)
160. Artemov D. (2003) Molecular magnetic resonance imaging with targeted contrast agents. J. Cell. Biochem. [PubMed]
161. Townsend, DW. (2004) Physical principles and technology of clinical PET imaging. Ann Acad Med Singapore. [PubMed]
162. Beherens CF, King ER, Carpender JWJ. (1969) Atomic Medicine. Edit. Williams and Wilkins. Baltimore
163. Wagner HN Jr. (1968) Principles of Nuclear Medicine. Edit. W.B. Saunders Company, Philadelphia
164. Wagner HN. (1991) Molecular Medicine. From Science to Service. Journal Nuclear Medicine. 5(1)
165. Sasaki Y, Kusakabe K. (1995) La medicina nuclear. Rev Salud Mundial :25(1)
166. Perkins AC. (1996) Medicina Nuclear: Ciencia y Seguridad, Editorial John Libbey y Compañía. Madrid
167. Behar DS. (1997) Física médica en radioterapia. Edit. Oriente. Santiago de Cuba
168. Brown BH, Smallwood RH, Barber DC, Lawford PV. (1999) Medical physics and biomedical engineering. Institute of physic publishing. Londres
169. Behar DS. (1997) Física médica en radioterapia. Edit. Oriente. Santiago de Cuba
170. Castellanos ME. (2006) Las nuevas tecnologías: necesidades y retos en radioterapia en América Latina. Rev Panam Salud Publica ;20(2)
171. Perkins AC. (1999) Medicina Nuclear: Ciencia y Seguridad, Editorial John Libbey y Compañía. Madrid

172. Organización Panamericana de la Salud. (2006) Estadísticas de salud en las Américas, Washington, :OPS; Disponible en: http://www.paho.org/Spanish/DD/AIS/hsa200 6. htm. Acceso el 9 de agosto de 2008.
173. Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR) (2000) Fuentes y Efectos de la Radiación Ionizante, Informe a la Asamblea General, Naciones Unidas.
174. Colectivo de Autores. (2002) Protección Radiológica en la Aplicación de las Técnicas Nucleares, Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, Centro Nacional de Seguridad Nuclear, La Habana
175. Cox R. (1994) Mecanismos moleculares de la radioncogénesis, Revista Internacional de Biología de las Radiaciones, 65(1)
176. Skvarca J, Aguirre A. (2006) Normas y estándares aplicables a los campos electromagnéticos de radiofrecuencias en América Latina: guía para los límites de exposición y los protocolos de medición. Rev Panam Salud Publica ;20(2)
177. Arias CF. (2006) La regulación de la protección radiológica y la función de las autoridades de salud. Rev Panam Salud Publica ;20(2)
178. Skvarca J, Aguirre A. (2006) Normas y estándares aplicables a los campos electromagnéticos de radiofrecuencias en América Latina: guía para los límites de exposición y los protocolos de medición. Rev Panam Salud Publica;20(2/3)